مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية
المنظمة العربية للترجمة

ستيفان ك. و. كراوتر

توليد القدرة الكهربائية من الطاقة الشمسية أنظمة الطاقة الفولتضوئية

ترجمة
د. عبد الباسط علي صالح كرمان

سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدّمة

توليد القدرة الكهربائية
من الطاقة الشمسية
أنظمة الطاقة الفولتضوئية

المنظمة العربية للترجمة

ستيفان ك. و. كراوتر

توليد القدرة الكهربائية من الطاقة الشمسية

أنظمة الطاقة الفولتضوئية

ترجمة

د. عبد الباسط علي صالح كرمان

مراجعة

د. محمد عبد الستار الشيخلي

توزيع: **مركز دراسات الوحدة العربية**

الفهرسة أثناء النشر ـ إعداد المنظمة العربية للترجمة
كراوتر، ستيفان ك. و.
توليد القدرة الكهربائية الشمسية: أنظمة الطاقة الفولتضوئية/ ستيفان ك. و. كراوتر؛ ترجمة عبد الباسط علي صالح كرمان؛ مراجعة محمد عبد الستار الشيخلي.
445 ص. ـ (تقنيات استراتيجية ومتقدّمة ـ الطاقة؛ 2)
بيبليوغرافيا: ص 403 ـ 427.
يشتمل على فهرس.
ISBN 978-9953-0-1996-3
1. الطاقة الشمسية. 2. الكهرباء ـ توليد. أ. العنوان. ب. كرمان، عبد الباسط علي صالح (مترجم). ج. الشيخلي، محمد عبد الستار (مراجع). د. السلسلة.
621.31

Krauter, Stefan C. W.
Solar Electric Power Generation - Photovoltaic Energy Systems: Modeling of Optical and Thermal Performance, Electrical Yield, Energy Balance, Effect on Reduction of Greenhouse Gas Emissions

المنظمة العربية للترجمة
بناية «بيت النهضة»، شارع البصرة، ص. ب: 5996 ـ 113
الحمراء ـ بيروت 2090 1103 ـ لبنان
هاتف: 753031 ـ 753024 (9611) / فاكس: 753032 (9611)
e-mail: info@aot.org.lb - http://www.aot.org.lb

توزيع: **مركز دراسات الوحدة العربية**
بناية «بيت النهضة»، شارع البصرة، ص. ب: 6001 ـ 113
الحمراء ـ بيروت 2407 2034 ـ لبنان
تلفون: 750084 ـ 750085 ـ 750086 (9611)
برقياً: «مرعربي» ـ بيروت / فاكس: 750088 (9611)
e-mail: info@caus.org.lb - Web Site: http://www.caus.org.lb

الطبعة الأولى: بيروت، آذار (مارس) 2011

المحتويات

تـقـديـم

سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة

ضمن مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي

يطيب لي أن أقدم لهذه السلسلة التي جرى انتقاؤها في مجالات تقنية ذات أولوية للقارئ العربي في عصر أصبحت فيه المعرفة محركاً أساسياً للنمو الاقتصادي والتقني، ويأتي نشر هذه السلسلة بالتعاون بين مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية والمنظمة العربية للترجمة ويقع في إطار تلبية عدد من السياسات والتوصيات التي تعنى باللغة العربية والعلوم، ومنها:

أولاً: البيان الختامي لمؤتمر القمة العربي المنعقد في الرياض 1428هـ ـ 2007 م الذي يؤكد على ضرورة الاهتمام باللغة العربية، وأن تكون هي لغة البحث العلمي والمعاملات حيث نص على ما يأتي: (وجوب حضور اللغة العربية في جميع الميادين بما في ذلك وسائل الاتصال، والإعلام، والإنترنت وغيرها).

ثانياً: «السياسة الوطنية للعلوم والتقنية» في المملكة العربية السعودية التي انبثق منها اعتماد إحدى عشرة تقنية إستراتيجية هي: المياه، والبترول والغاز، والبتروكيميائيات، والتقنيات المتناهية الصغر

(النانو)، والتقنية الحيوية، وتقنية المعلومات، والإلكترونيات والاتصالات والضوئيات، والفضاء والطيران، والطاقة، والمواد المتقدمة، والبيئة.

ثالثاً: مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي التي تُفعِّل أيضاً ما جاء في أولاً عن حضور اللغة العربية في الإنترنت، حيث تهدف إلى إثراء المحتوى العربي عبر عدد من المشاريع التي تنفذها مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية بالتعاون مع جهات مختلفة داخل المملكة وخارجها. ومن هذه المشاريع ما يتعلق برقمنة المحتوى العربي القائم على شكل ورقي وإتاحته على شبكة الإنترنت، ومنها ما يتعلق بترجمة الكتب المهمة، وبخاصة العلمية، ما يساعد على إثراء المحتوى العلمي بالترجمة من اللغات الأخرى إلى اللغة العربية بهدف تزويد القارئ العربي بعلم نافع مفيد.

تشتمل السلسلة على ثلاثة كتب في كل من التقنيات التي حددتها «السياسة الوطنية للعلوم والتقنية». واختيرت الكتب بحيث يكون **الأول** مرجعاً عالمياً معروفاً في تلك التقنية، ويكون **الثاني** كتاباً جامعياً، **والثالث** كتاباً عاماً موجهاً لعامة المهتمين، وقد يغطي كتاب واحد أو أكثر كل ذلك مجتمعاً. وعليه، تشتمل سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة على ما مجموعه ثلاثة وثلاثين كتاباً مترجماً، كما خُصِّص كتاب إضافي منفرد للمصطلحات العلمية والتقنية المعتمدة في هذه السلسلة كمعجم للمصطلح.

ولقد جرى انتقاء الكتب وفق معايير عدة، منها أن يكون الكتاب من أمهات الكتب في تلك التقنية، ولمؤلفين يُشهد لهم عالمياً، وأنه قد صدر بعد عام 2000، وأن لا يكون ضيق الاختصاص بحيث يخاطب فئة محدودة، وأن تكون النسخة التي يترجم عنها مكتوبة باللغة التي ألّف بها الكتاب وليست مترجمة عن

لغة أخرى، وأخيراً أن يكون موضوع الكتاب ونهجه عملياً تطبيقياً يصب في جهود نقل التقنية والابتكار ويساهم في عملية التنمية الاقتصادية من خلال زيادة المحتوى المعرفي العربي.

إن مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية سعيدة بصدور هذه المجموعة من الكتب، وأود أن أشكر المنظمة العربية للترجمة على الجهود التي بذلتها لتحقيق الجودة العالية في الترجمة والمراجعة والتحرير والإخراج، وعلى حسن انتقائها للمترجمين المتخصصين، وعلى سرعة الإنجاز، كما أشكر اللجنة العلمية للمجموعة التي أنيط بها الإشراف على انجازها في المنظمة وكذلك زملائي في مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية الذين يتابعون تنفيذ مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي.

الرياض 20/ 3/ 1431 هـ

رئيس مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية

د. محمد بن إبراهيم السويل



تمهيد

هناك قلق حول العالم بشأن احتياطيات الطاقة. فالطلب على الكهرباء قد ازداد في السنوات الأخيرة بمعدل أسّي؛ وإذا الطلب على الفحم الحجري، والنفط، والغاز الطبيعي قد اتبع تقريباً قانون الخط المستقيم، فهذا يعني أن ميل الخط أصبح يثير قلقاً لكل أمة على حدة حول موعد نفاد إمداداتها الخاصة من الوقود الإحفوري، وللعالم بشكل عام حول مصادر الطاقة الأخرى الممكنة عندما لا يكون هناك فحم حجري أو نفط... ونتيجة لهذا الوضع، هناك نشاط عظيم في جميع أنحاء العالم للتدبر في احتياطيات الفحم الحجري عن طريق استخدام مصادر طاقة أخرى.

من مجلة **الطبيعة** (*Nature*)، **5 آب/ أغسطس 1950**

1- إذا كانت اتجاهات النمو الحالية في سكان العالم، والتصنيع، والتلوث، وإنتاج الغذاء، ونضوب الموارد تستمر من دون تغيّر، فإن حدود النمو على هذه الكوكب سيتم بلوغه في وقت ما خلال المئة سنة القادمة. النتيجة الأكثر احتمالاً ستكون انحداراً مفاجئاً وغير قابل للسيطرة في كلٍّ من السكان والقدرة الصناعية.

2- من الممكن تغيير اتجاهات النمو هذه وتأسيس حالة استقرار بيئي واقتصادي تستديم طويلاً في المستقبل. وحالة التوازن العالمي يمكن تصميمها بحيث تتحقق الاحتياجات الأساسية من المادة لكل

شخص على الأرض ويكون لكل شخص فرصة متساوية لإدراك قدراته البشرية الفردية.

3- إذا قرر سكان العالم أن يجاهدوا من أجل هذه النتيجة الثانية بدلاً من الأولى، فإنهم كلما أسرعوا في البدء بالعمل لإحرازها كلما كانت فرصتهم أكبر للنجاح.

ملخص **حدود النمو**، (*The Limits of Growth*)

(Meadows [et al.]) 1972

منذ المقالة الذي نُشرت في مجلة **أسرار الطبيعة** قبل أكثر من نصف قرن، فإن ملخص التقرير المُقدَّم إلى «نادي روما» قد مر عليه أكثر من ربع قرن. في هذه الأثناء - وبعد المناقشات المستفيضة في السبعينيات وأوائل الثمانينيات - فإن هذه الأطروحات تعتبر مقبولة حتى من قِبَل المعارضين المتشددين السابقين. ويبدو حتى أن ما كانوا يُسَموْن سابقاً بـ«صنّاع الرعب» أصبحوا يعدّون مقبولين بداهة في الوقت الحاضر. ومن ناحية أخرى، يبدو كما لو أننا قد تجاوزنا الحدود المذكورة ـ ارتفاع درجة الحرارة العالمية، وتراكم الكوارث الطبيعية في العقد الماضي يشيران إلى ذلك ـ بالرغم من التقنية الفضلى، والقوانين البيئية الأقوى، والمؤتمرات العديدة، والإحساس العام الزائد بيئياً. كانت سنة 1998 إلى حد كبير الأكثر سخونة منذ أن بدأت السجلات العالمية. فقد بلغ متوسط درجة الحرارة العالمية مستوى تجاوز فيه كل المستويات المسجلة خلال السنوات الـ 130 الماضية وأكّد الاتجاه الواضح (ميونيخ لإعادة التأمين 1998). والرضوخ أو الاستسلام لا يقربنا من بعضنا البعض لإنجاز حاجاتنا الواردة في التقرير. وقد تم تأليف هذا الكتاب كإسهام بسيط للبدء في تطوير مستدام. أشكر بإخلاص جميع أولئك الذين ساعدوا لتحسينه:

الدكتور بول غرونو (Paul Grunow) من Q-Cells، والدكتور كريستوف بومان (Christoph Baumann) والدكتور دايتر ميركل (Dieter Merkle) من دور نشر سبرنغر العلمية، وكيث بارسونس (Keith Parsons) من جامعة نيويورك، وجميع الطلاب الذين ساهموا بشكل كبير في المشاريع البحثية. وأتقدم بالشكر الخاص إلى الدكتور فرانز ألت (Franz Alt) والدكتور هيرمان شير (Hermann Scheer) على مقدمتيهما المشجعتين، وإلى البروفيسور مارتن غرين (Martin Green) على نبذته التاريخية عن الفولتضوئية.

ريو دي جانييرو وفورتاليزا، تشرين الأول/ أكتوبر 2005

ستيفان كراوتر

بروفيسور ومهندس مختص



مقدمة الدكتور فرانز ألت

الدكتور فرانز ألت هو صحفي تلفزيوني، ومحرِّر، ومؤلف للكتب الأكثر رواجاً.

حصل على الجائزة الشمسية الألمانية لعامي 1994 و2004، وجائزة حقوق الإنسان لعام 2003، وجائزة الرسالة الإخبارية لعام 2003، وجائزة البيئة على الإنترنت «الموقع القمة للعمل التجاري» لعام 2002، والجائزة الشمسية الأوروبية لعام 1997، وجائزة البيئة «طائر السنونو الذهبي» لعام 1992، وجائزة Siebenpfeiffer لعام 1987، وجائزة Karl-Hermann-Flach، وجائزة Drexel، ووسام Hans-Thoma لعام 1983، وجائزة Adoph Grimme لعام 1979، وجائزة بامبي التلفزيونية لعام 1978.

التحول إلى الطاقة الشمسية أمرٌ وارد

في القمة العالمية الأخيرة للأمم المتحدة، وُصفت حال كوكبنا على النحو الآتي:

- على نصف سكان العالم البقاء من أجل العيش بأقل من 2 يورو في اليوم.
- يموت 26,000 كل يوم من الجوع ومن قلة الماء.
- تستهلك الدول الصناعية في اليوم القدر نفسه من الفحم الحجري،

والغاز، والنفط الذي تولّده الطبيعة في 500,000 يوم.

- تنفق الولايات المتحدة كل 32 ساعة مبالغ للجيش والحروب ما يعادل ميزانية الأمم المتحدة السنوية.
- نتيجة لظاهرة الدفيئة، ينقرض كل يوم مئة نوع تقريباً من الحيوانات والنباتات.
- تزداد البشرية كل يوم بمقدار ربع مليون نسمة.
- يمتلك أغنى أربعة رجال في الولايات المتحدة مالاً أكثر مما يمتلكه أفقر بليون شخص على هذا الكوكب.

هل نحن مجانين؟ هل يمكن إنقاذنا؟

سيبحث هذا الكتاب عن أجوبة على ذلك السؤال الأساسي للمستقبل.

نحن أمام التحدي الاجتماعي، والاقتصادي، والأخلاقي الأكبر في التاريخ الإنساني. ونخوض بالفعل عدة حروب كبرى في الوقت نفسه:

- حروب من أجل الموارد الأخيرة لكوكبنا، مثلاً النفط في العراق.
- حرب عالمية ضد الطبيعة وبالتالي ضد أنفسنا.

التغيّر المناخي قد يتحول إلى انهيار مناخي وبالتالي يكون خطراً مهدداً لحياة البشرية. عواقب الاحتباس الحراري العالمي التي حدثت في الشهور الأخيرة فقط هي: فيضانات في بافاريا، والنمسا، وسويسرا بأضرار قدِّرت ببلايين اليورو، وأعاصير استوائية في شرق آسيا تسببت بخسائر في الأرواح بلغت 150 شخصاً، وأعاصير في جنوب الولايات المتحدة بعدة آلاف من الوفيات و200 بليون دولار من الأضرار، ونشاطات إعصارية متزايدة في منطقة الكاريبي بأكمله.

توقع الباحثون في المناخ تلك الأوضاع بشكل دقيق مدهش. فنحن لم نرغب فيها وقمنا بقمع الخطر. لقد كان الجشع، والجهل

والكسل أقوى من القدرة على الفهم، والتذلل لقوانين الطبيعة، ورغبتنا في التغيير.

والمثير بشكل أكبر عن مستقبل البشرية والحياة كلها على كوكبنا هو حقيقة أنه في المستقبل، جميع الـ 5.6 بليون نسمة يريدون العيش مثل الـ 800 مليون نسمة في الدول الصناعية. نحن نعلم أن كوكبنا لن يتحمل ذلك التطور. ومن ناحية أخرى، فإن ذلك التطور لا يمكن إيقافه. سيطالب «المعدومون» السابقون بحقهم العادل في أن يعيشوا كما نعيش نحن.

مواطنون نحو الشمس، نحو الحرية ـ يبدأ العصر الشمسي

لقد سميت رؤية الإنسان للقرن الحادي والعشرين برؤية «العصر الشمسي». ونحن قادرون على أن نحقق إمداداً للطاقة المتجددة بمقدار 100 في المئة خلال الـ 40 عاماً القادمة. لن نحتاج إلى النفط من الشرق الأوسط، أو غاز من سيبيريا، أو يورانيوم من أستراليا. لدينا جميع حاملات الطاقة التي سنحتاج إليها للمستقبل في المتناول: الشمس، والرياح، والقدرة المائية، والطاقة الجيوحرارية، والوقود الحيوي من الأراضي الزراعية والأخشاب.

وفقاً لدراسة من المفوضية الأوروبية، فإن إمداد الطاقة العالمي في عام 2050 يمكن أن يبدو على النحو الآتي:

- 40 في المئة قدرة شمسية
- 30 في المئة كتلة حيوية
- 15 في المئة قدرة رياح
- 10 في المئة قدرة مائية
- 5 في المئة نفط

والطريق نحو إمداد اقتصادي، وبيئي، وسلمي، ومستدام إلى الأبد للطاقة موضَّحة في تلك الدراسة. وشركات النفط الدولية المتعددة، مثل شل (Shell) وبريتيش بيتروليوم (BP)، قد توسعت داخلياً في سيناريوهات مماثلة للطاقة.

النفط، والجازولين، والفحم الحجري، والغاز تزداد أسعارها بشكل متزايد، وتقضي على البيئة، وستنضب خلال بضعة عقود. وإنه من الحكمة التغيير في حينه، بدلاً من الخراب الإضافي لكوكبنا. صحيح أن التحول إلى الطاقة الشمسية سيكلفنا بعض المال، إلاّ أن تغيير الطاقة لن يكلفنا عالمنا.

الشمس، والرياح، والقدرة المائية، والطاقة الجيوحرارية، والوقود الحيوي متوافرة إلى الأبد بأسعار مناسبة. والكل سيستفيد: المناخ، والاقتصاد، والأعمال، وأنت وأنا، وإلى درجة أكبر، أطفالنا وأحفادنا.

معدلات البطالة في ألمانيا، وأوروبا، والعالم عالية، والاقتصاديات راكدة ـ لكن الطاقات المتجددة هي الفرع النامي للصناعة. والأمثلة على ذلك:

- قامت الصين في عام 2004 بتنصيب أكثر من 18 مليون متر مربع من المجمعات الشمسية الحرارية.
- تمتلك اليابان أكبر المشاريع الفولتضوئية في العالم وأوجدت مئات الآلاف من الأعمال بواسطتها (وهي أساساً تستخدم تقنية شمسية ألمانية).
- ألمانيا هي المتصدرة في العالم بإنتاج وتطبيق توربينات الرياح. ستة بالمئة من كهرباء ألمانيا تم توليدها بالفعل بواسطة قدرة الرياح في عام 2005.
- ستقوم كاليفورنيا، في عهد محافظها آرنولد شوارزنغر، بإنتاج ثلث

حاجاتها من الطاقة عن طريق مصادر الطاقة المتجددة، والفلبين ستصل إلى 40 بالمئة بحلول ذلك الوقت.

- تقوم البرازيل بالفعل بإنتاج أكثر من 25 بالمئة من وقود سياراتها بواسطة مواد خام مجدَّدة.

هل كل ذلك يمكن تمويله؟

الميزة الاقتصادية الكبرى لتوليد الطاقة البيئية هي أن الشمس، والرياح، والقدرة المائية، والطاقة الجيوحرارية سوف لن ترسل أيّ فواتير إطلاقاً. المادة متوافرة تقريباً في كل مكان حيثما نحتاج إليها ـ من دون الحاجة إلى طرق النقل العالمية المعقدة. ما نحتاج إليه هو الإنتاج الواسع من تقنيات الطاقة الجديدة. الأسعار لتلك الطاقة قد انخفضت بمقدار 50 بالمئة منذ عام 1995 ـ وتكاليف الطاقة القديمة تضاعفت بحلول تلك الفترة. فالشخص الذي يقوم بحرق أكوام الخشب في الوقت الحاضر بدلاً من استخدام وقود النفط للتدفئة يدفع حوالى نصف السعر.

ستصبح ملمّاً بشكل أكبر بأمثلة مفاجئة مماثلة في هذا الكتاب المهم من قِبَل ستيفان كراوتر. رسالة هذا الكتاب ورسالة مؤتمر RIO 6 (www.RIO 6.com) هي:

التحول إلى الطاقة الشمسية أمرٌ وارد، والعصر الشمسي قد بدأ بالفعل.

بادن ـ بادن، تشرين الأول/ أكتوبر 2005

الدكتور فرانز ألت

www.sonnenseite.com



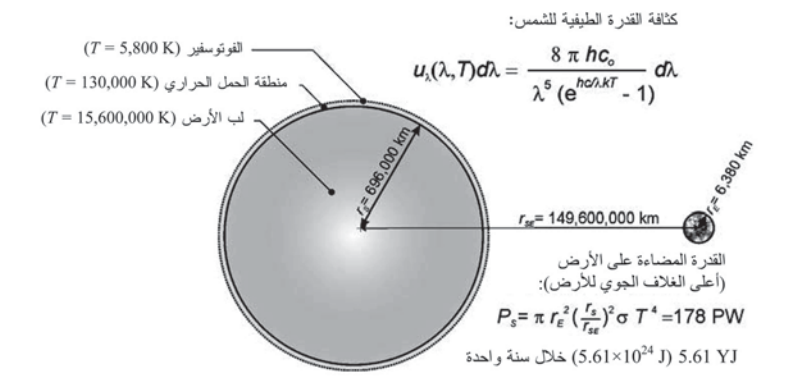
مقدمة الدكتور هيرمان شير

الدكتور هيرمان شير هو عضو البرلمان الألماني منذ عام 1980، ورئيس الرابطة الأوروبية للطاقات المتجددة، والرئيس العام للمجلس العالمي للطاقات المتجددة منذ عام 2001. حائز على الجائزة الشمسية العالمية لعام 1998، وجائزة نوبل البديلة لعام 1999، والجائزة العالمية للطاقة الحيوية لعام 2000، و«بطل القرن الأخضر» لمجلة **التايم** (*TIME*) لعام 2002، والجائزة العالمية لقدرة الرياح، وجائزة قيادة الطاقة المتجددة العالمية لعام 2004.

إسهام الطاقة الحقيقي للشمس

تساهم الطاقة الشمسية بالفعل إلى حد 94 في المئة من استخدام كوكبنا للطاقة: تقوم الطاقة الشمسية بتدفئة سطح الأرض وغلافها الجوي من درجة حرارة الفضاء البالغة ºC 273.2 ـ إلى درجة حرارة +14.5ºC في المتوسط، وهي بهذا تمكِّن جميع أشكال الحياة.

من دون الطاقة الشمسية، ستكون الأرض قطعة صخرية ميتة في الفضاء بدرجة حرارة قريبة من الصفر المطلق. للسماح باستيطان الإنسان عليها تحت تلك الظروف، سنحتاج إلى طاقة تجارية أكثر بحوالى 15 مرة مما نستهلكه اليوم (15 إلى 429,4 EJ). وجميع موارد الوقود الإحفورية ستُستنزَف خلال سنتين.



جميع موارد الطاقة الإحفورية الحالية، مثل الفحم الحجري، والنفط، والغاز، مشتقة من الكتلة الحيوية والتمثيل الضوئي، أي إنه من الطاقة الشمسية: قام كوكبنا بامتصاص ضوء الشمس لمئات الملايين من السنوات لتكوين جميع تلك الموارد الإحفورية التي تدوم فقط لمدة 200 سنة من حضارة الإنسان الصناعية.

الفولتضوئية ـ التطبيق الأكثر تنوعاً للطاقة الشمسية

تمكّن القدرة الكهربائية الشمسية المتولدة عن طريق التحويل المباشر للأشعة الشمسية إلى كهرباء ـ الفولتضوئية ـ البشرية من استغلال ضوء الشمس بطريقة نظيفة، وأبدية، ومتعددة الاستعمالات إلى حد كبير. في الوقت الحاضر، تقوم الأنظمة الفولتضوئية التجارية بتحويل 15 في المئة من الإشعاعية الشمسية القادمة على الأقل لمدة 30 عاماً إلى كهرباء مستدامة على جميع أجزاء الأرض.

يوفّر هذا الكتاب قدراً كافياً من المعلومات، معالجاً التغير المناخي المتسبب بواسطة الإنسان، وإمكانية الفولتضوئية على خفض انبعاثات غاز الدفيئة لسيناريوهات مختلفة (الربط الشبكي وغير الشبكي، والتطبيقات في المناطق المدارية وفي وسط أوروبا)،

وتحليل دورة الحياة، شاملاً إعادة تدوير مكونات النظام. وتستند النتائج إلى نموذج شامل لحساب مردود الكهرباء الفعلي لمحطات القدرة الفولتضوئية. وذلك النموذج يأخذ بعين الاعتبار جميع الأسطح والطبقات البصرية التي تمر من خلالها الأشعة القادمة من الشمس إلى الخلية الشمسية، والمخطط الحراري لأيّ تصميم للمنظومة الفولتضوئية وآلياتها لنقل الحرارة، وكفاءتها الفعلية للتحويل الكهروضوئي، ما يسمح بالحساب الدقيق للمردود وتحسين مكونات النظام الفولتضوئي، وبالتالي خفض تكاليف الكهرباء الشمسية.

ويُعتبر الكتاب بجداوله وبياناته المرجعية مصدراً قيّماً للمعلومات للمتخصصين في الأنظمة الفولتضوئية، وطلاب الفيزياء، والهندسة، والبيئة، ولكل من له اهتمام بموضوع الكهرباء الشمسية.

برلين، تشرين الثاني/ نوفمبر 2005

الدكتور هيرمان شير



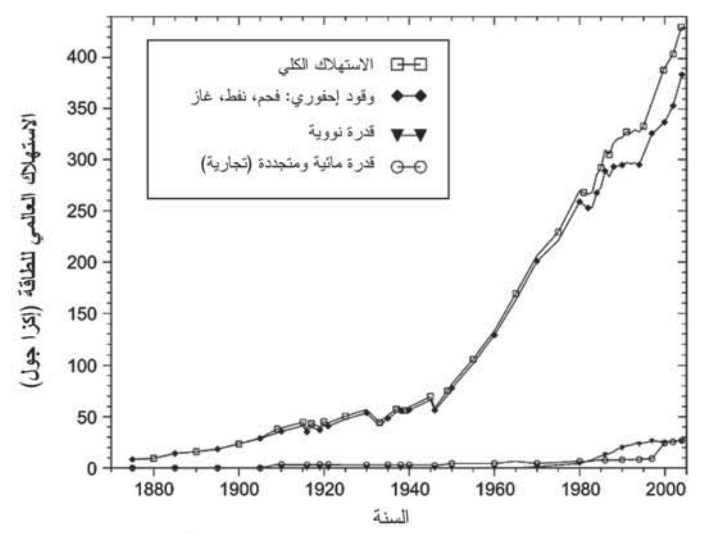
الفصل الأول

المقدّمة

1-1 الاستهلاك العالمي للطاقة

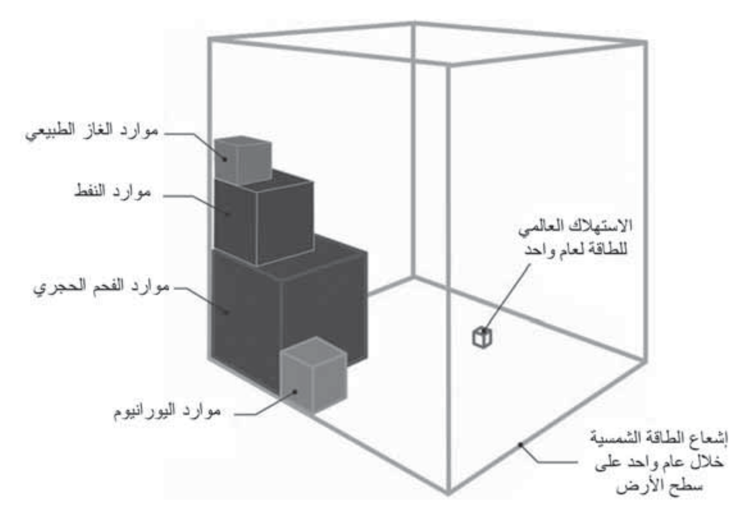
باستخدام الوقود الإحفوري مثل الخشب، والفحم الحجري، والنفط، والغاز، تمكنت البشرية من إقامة حضارة في المناخات الباردة. وبسبب الطلبات المتزايدة لوسائل الراحة، والزيادة في التحرك والتنقل، والنمو المتزايد في عدد سكان العالم، ارتفع استهلاك الطاقة بشكل هائل خلال الـ 150 سنة الماضية (انظر الشكل (1 ـ 1)، ومن المتوقع استنفاذ هذه الوقود خلال نصف المدة المحددة لها.

إضافة إلى ذلك، يعيق ثاني أكسيد الكربون المنبعث تبادل الإشعاع الحراري بين سطح الأرض والفضاء، ما يتسبب في تأثيرات التغيّر المناخي (انظر الفصول الآتية). وبالرغم من أن هذه الحقائق معروفة منذ مطلع السبعينيات (Meadows [et al.], 1972)، إلاّ أن الاستهلاك البشري للطاقة (وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون المتعلقة بها) ارتفع إلى 429.4 EJ ($429.4\ J \times 10^{18}$) في عام 2004.



الشكل (1-1): الاستهلاك العالمي للطاقة الأساسية بالإكزا جول (EJ) (10^{18} جول) كدالة في الزمن للأعوام (1875 - 2004) مع إسهامات الوقود الباعثة والخالية من ثاني أكسيد الكربون

المصادر: 1875-1965: Interatom-Shell-Study 1992, 1970-1988: UN yearbook of World Energy Statistics, 1989 – 2004: BP Statixtic Review of World Energy, 1996.

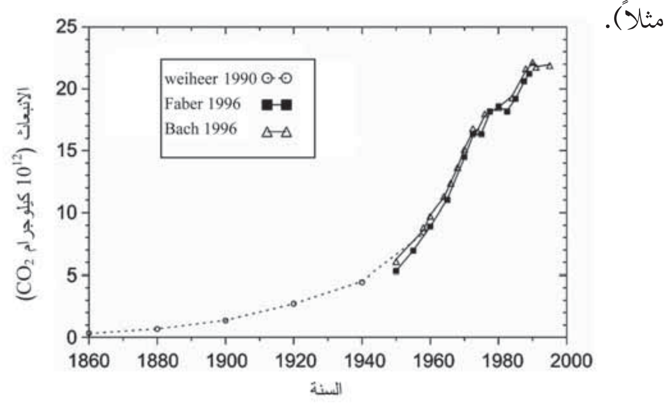


الشكل (1-2): الاستهلاك العالمي للطاقة مقارنة بجميع موارد العالم الإحفورية وقدراته السنوية من الطاقة الشمسية (مقتبس من غرينبيس (Greenpeace)).

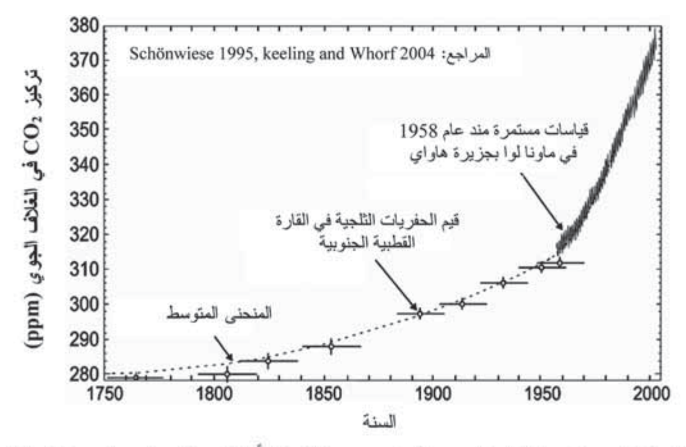
يوضح الشكل (1 ـ 2) قدرات الطاقة الشمسية: الأشعة الشمسية على الأرض أعلى بمقدار 14000 مرة من الاستهلاك العالمي للطاقة. وبتجميع ذلك على مدار عام واحد، فإن طاقة الإشعاعية الشمسية على الأرض أكبر بكثير من جميع الموارد المعروفة للوقود الإحفوري.

1 ـ 2 انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بواسطة الإنسان

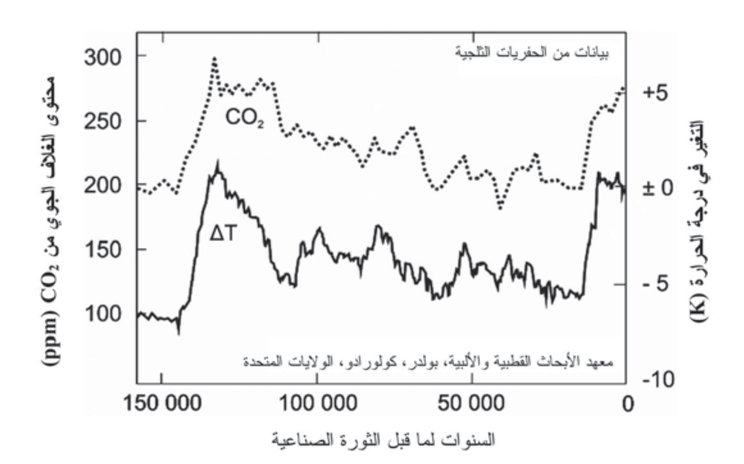
لقد تحقّقت احتياجات الإنسان للطاقة بإحراق الوقود الإحفوري مثل الفحم الحجري، والنفط، والغاز، التي أدَّت تبعاً لذلك إلى ارتفاع انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون، وخصوصاً منذ بداية الثورة الصناعية، كما هو مبيّن في الشكل (1 ـ 3). التحويل مرة أخرى من ثاني أكسيد الكربون إلى الأكسجين بواسطة التمثيل الضوئي (photosynthesis) لا يمكن إجراؤه بشكل كامل من خلال كمية النباتات (الكتلة الحيوية) الموجودة حالياً؛ وبالتالي يلاحَظ تراكم غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي (انظر الشكل (1 ـ 4)). يزداد هذا التأثير مع انخفاض كمية النباتات (بسبب إزالة الغابات مثلاً).



الشكل (1-3): الانبعاثات العالمية البشرية المنشأ لثاني أكسيد الكربون خلال الأعوام (1860-1995) وفقاً لويهير (Weiheer) 1990، وفابر (Faber) 1996، وباخ (Bach) 1996، والرصد العالمي (Worldwatch) 2000.



الشكل (1-4): محتوى الغلاف الجوي الأرضي من CO_2 مقاساً بالجزء لكل مليون (ppm) كدالة في الزمن. قبل كشف عام 1958 بالحفر في القارة القطبية الجنوبية: مشار إلى مدى اليقين في البيانات؛ وما بعد عام 1958 كانت هناك قياسات مستمرة في ماونا لوا (Mauna Loa) بجزيرة هاواي. الرسم البياني يستند إلى بيانات شونويس1995 (Schönwiese) ، وكيلنغ وهورف2004 (Keeling &Whorf).



الشكل (1-5): العلاقة بين محتوى الغلاف الجوي للأرض من ثاني أكسيد الكربون والتغير في درجة حرارة الغلاف الجوي من عام 150,000 قبل الميلاد إلى عام 1750 وفقاً لبيانات معهد الأبحاث القطبية وجبال الألب ,(Institute of Arctic and Alpine Research) Bolder USA Colorade، نُشر في مجلة **الجغرافيات الوطنية** (*National Geographics*)، 2000.

1 ـ 3 الاحتباس الحراري العالمي بواسطة ثاني أكسيد الكربون

بالرغم من أن المكونات الرئيسة للغلاف الجوي (N_2 وO_2) تسمح بالنفاذية الجيدة نفسها للأشعة الشمسية الساقطة كما للأشعة الحرارية المنبعثة من سطح الأرض إلى الفضاء، إلاّ أن الغازات ذات الصلة بتأثير الدفيئة (Greenhouse Effect) (مثل بخار الماء، والميثان، وأكسيد النيتروز، والأوزون) تُظهر نفاذية جيدة فقط للجزء المرئي من الأشعة وتعيق انبعاث الأشعة تحت الحمراء الحرارية من الأرض إلى الفضاء. يحدث عندئذ اتزان بين تدفق الطاقة الداخلة والخارجة عندما يشع سطح الأرض مزيداً من الأشعة تحت الحمراء، وهذا يحدث عند درجات الحرارة الأعلى لسطح الأرض ـ تأثير الدفيئة. ومن دون هذا التأثير الطبيعي للدفيئة، فإن سطح الأرض سيكون أبرد بحوالى 30 K. يبيّن الجدول (1-1) ملخصاً بالتأثيرات المحتملة لغازات الدفيئة الطبيعية.

لقد تسبّب النشاط البشري في زيادة انبعاثات غازات الدفيئة الطبيعية والاصطناعية، وبشكل خاص منذ بداية عصر الصناعة. ونتيجة لذلك، تم أسْر كميات كبيرة من الأشعة تحت الحمراء الحرارية في الغلاف الجوي ما أدى إلى زيادة درجة حرارة سطح الأرض. ازدادت الأشعة تحت الحمراء المنبعثة من الأرض والمنعكسة بواسطة الغلاف الجوي بحوالى 1 في المئة منذ عام 1850 (أو بمقدار 3 وات/ متر^2 (W/m^2) فوق الانعكاس الخلفي الطبيعي البالغ 320 W/m^2. انظر فيشيديك وآخرون (Fischedick [et al.] 1999).

الجدول (1-1): مكونات تأثير الدفيئة الطبيعية (شونويس 1995 (Schönwiese)).

الغاز ومركبه الكيميائي	إسهام الزيادة الطبيعية لدرجة الحرارة	الإسهام النسبي ٪
بخار الماء، H_2O	20.6 K	62 في المئة
ثاني أكسيد الكربون، CO_2	7.2 K	22 في المئة
أوزون بالقرب من الأرض، O_3	2.4 K	7 في المئة
أكسيد النيتروز، N_2O	1.4 K	4 في المئة
الميثان، CH_4	0.8 K	3 في المئة
أخرى	حوالى Ca 0.6 K	2 في المئة
مجموع الإسهامات	33 K(1)	100 في المئة

(1) التقديرات الأخرى تبيّن تأثيراً إجمالياً ما بين 15 K إلى 20 K فقط؛ كما تبيّن أبحاث «اللجنة الحكومية الدولية لتغير المناخ» (IPCC 1994) تأثيراً قدره 30 K (شاملاً السحب).

لقد تم وضع فرضية تغيّر المناخ بسبب المحتوى المرتفع لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي في عام 1896 من قِبَل الكيميائي السويدي سافانتي أرهينيوس (Savante Arrhenius) (انظر Arrhenius 1896). بشكل مثير للدهشة، توقع أرهينيوس بشكل دقيق جداً حجم تأثير الدفيئة بمقدار 5 K عندما تتضاعف محتويات ثاني أكسيد الكربون. وازداد الاهتمام بأبحاث المناخ في عام 1938 عندما بيّن الكيميائي البريطاني كاليندار (Callendar) زيادة ثاني أكسيد كربون الغلاف الجوي خلال العقود الماضية. بالرغم من ذلك، فإن التركيز الدولي على ثاني أكسيد الكربون لم يبدأ حتى عام 1971 - 1972 عندما تم التعرف إلى أن تأثيرات ثاني أكسيد الكربون يمكن أن تكون بمثل خطورة التلوث العام للهواء، الذي كان في مقدمة المناقشات آنذاك.

في عام 1977، قامت المنظمة الدولية للأرصاد الجوية، وهي منظمة تابعة للأمم المتحدة ومقرها في جنيف بسويسرا، بدعوة لجنة من الخبراء، التي طالبت بضرورة عقد مؤتمر عالمي للمناخ. في عام 1980، انعقد ذلك المؤتمر وعمل على تنشيط الأبحاث الدولية التي أدت إلى زيادة واسعة في المعرفة عن المناخ ـ وبشكل محدد تماماً آليات تغيّر المناخ وتأثير الدفيئة.

يبيّن الجدول (1 ـ 2) نتائج حديثة لتأثير الانبعاثات في المناخ. ومن الواضح أن لثاني أكسيد الكربون البشري المنشأ بمؤثرية إجمالية 61 في المئة (50 في المئة وفقاً لفلوهن (Flohn, 1989)) التأثير الأكبر في الاحتباس الحراري العالمي، بينما يساهم الميثان عند 15 في المئة، والفريون (FCCH) عند 11 في المئة (20 في المئة وفقاً لفلوهن 1989) والأوزون عند 9 في المئة (10 في المئة وفقاً لفلوهن 1989) بمقادير أقل.

يمكن التحقّق من الكفاءة المناخية لتأثير الدفيئة بقياس درجة حرارة الجو. وبالرغم من التقلبات، إلاّ أن زيادة واضحة لدرجة حرارة الجو العالمية عند مستوى سطح البحر بمقدار 0.5 K إلى 1.0 K قد حدثت منذ نهاية القرن الماضي، كما هو مبيّن في الشكل (1 ـ 6). وإلى جانب التأثيرات الأرصادية (رياح وتيارات المحيطات، ومستوى البحر، ومستوى المياه الجوفية)، فإن هذه الزيادة تسبب أيضاً تغيرات في النشاط الحيوي[1] التي قد تؤدي إلى تغيرات مهمة في بيئة الإنسان.

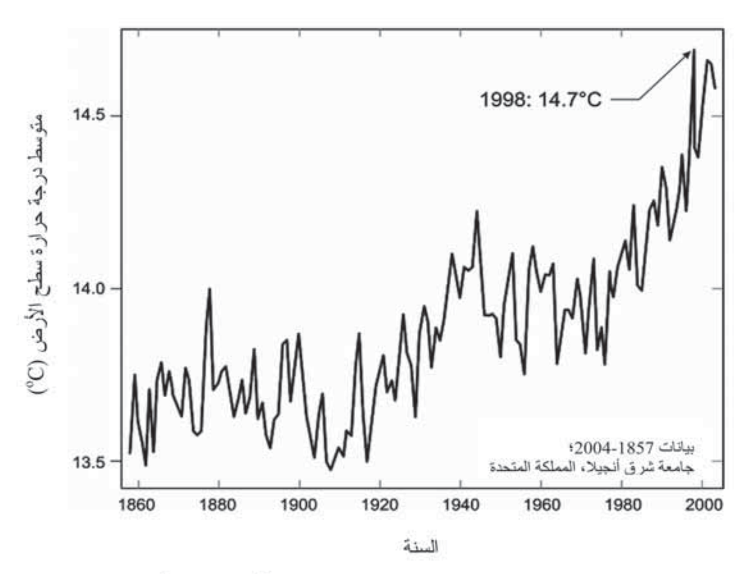
---

(1) زيادة درجة الحرارة بمقدار 10 K تؤدي إلى مضاعفة سرعة التفاعلات الكيميائية الحيوي (قاعدة RGT) إلى الحد الأعلى لدرجة الحرارة (حوالى 60 C للإنزيمات)، انظر ليندر (Linder) 1948/ 1977.

الجدول (1 ـ 2): تركيز غازات الدفيئة في الغلاف الجوي والكفاءة المناخية للغازات الضئيلة المنبعثة ذات المنشأ البشري (Schönwiese 1995، وIPCC 2001).

الغاز (الصيغة الكيميائية)	التركيز في حوالى عام 1800 (ppm)	التركيز في عامي 1991 و2005 (ppm)	الانبعاثات البشرية (ميغاطن/سنة) (M_t/a)	متوسط الزمن المتبقي (سنة) (a)	المؤثرية المولارية النسبية للدفيئة[1]	الإسهام على إجمالي التأثير[3] (%)
CO_2	280	355 (1991) 380 (2005)	290000	$10^4 - 5$	1	61
CH_4	0.8	1.7	400	10	11 (23)[2]	15
CFC, CFM (فريون)	0	0.00025 إلى 0.00045	1	55 إلى 115	3400 إلى 7100 (12000)[2]	11
N_2O	0.29	0.31	حوالى 10	130	270 (296)[2]	4
O_3	غير معروف	0.015 إلى 0.05	حوالى 500	0.1 إلى 0.25	غير معروف	9[5]

1) الكفاءة المولارية النسبية للدفيئة بافتراض أفق زمني 100 سنة.
2) تمثل القيم التي بين القوسين النتائج الحديثة التي نشرتها «اللجنة الحكومية الدولية لتغير المناخ» (IPCC, 2001
3) إسهام تأثير الدفيئة البشري المنشأ لأفق زمني 100 سنة.
4) زمن التأثير البشري المنشأ 50 إلى 200 سنة.
5) تشمل جميع غازات الكشف الأخرى ذات الصلة.

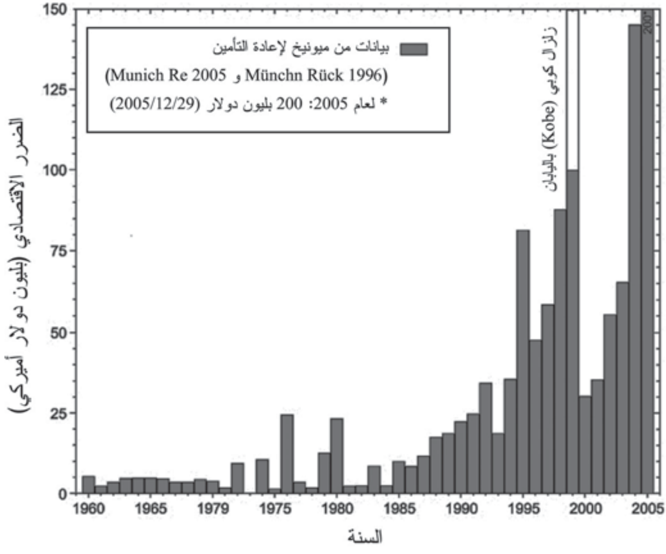


الشكل (1-6): درجة حرارة الجو المشاهدة بالقرب من الأرض (مع أخذ متوسطها على نصف الكرة الأرضية الشمالي) من عام 1858 إلى عام 2004.

يجب الأخذ في الاعتبار أيضاً بأن الزيادة الفعلية لدرجة الحرارة تصبح أقل مما يجب أن تكون عليه طبقاً لزيادة ثاني أكسيد كربون الغلاف الجوي. وهذا يحدث بسبب انخفاض مؤقت لدرجة الحرارة ناتج عن كبريتيد التروبوسفير البشري المنشأ (نيوينغر (Newinger) 1985، (Charlson [et al.], 1992)، و(Kiehl [et al.], 1993)، و(Kaufmann [et al.], 1993) و(Charlson [et al.], 1994). ونتائج هذه الزيادة في درجة حرارة الغلاف الجوي ليست فقط محدودة على التكرار الزائد للكوارث الطبيعية مثل الفيضانات والأعاصير، انظر الشكل (1 ـ 7)، بل أيضاً على الأنشطة الكيميائية والحيوية المرتفعة مثل تآكل المباني، والنمو السريع للبكتيريا، وانتشار الحيوانات الناقلة للأمراض. لوضع حد لمثل هذه الحوادث، يجب خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المُنتَجة اصطناعياً إما بتخفيض استهلاك الطاقة أو باستخدام الطاقات الباعثة لثاني أكسيد كربون أقل.

ومع ذلك، فإن أفضل حل هو المؤلَّف من كِلا الاستراتيجيتين: حفظ الطاقة واستبدال موارد الطاقة التقليدية (انظر الشكل (1 ـ 8)). ومن دون تبنّي هاتين الاستراتيجيتين فإن التوقعات الحالية المتصلة بتغير المناخ البشري المنشأ تتوقع حدوث زيادة في متوسط درجات الحرارة العالمية فوق ما قبل عصر الصناعة بمقدار 1 إلى 5.2 K بحلول العقد 2036 إلى 2046.

ملاحظة: هذا المدى نسبياً عرضة للأخطاء في الحساسية المناخية للنموذج، أو المعدلات الحرارية المتصاعدة للمحيطات، أو الاستجابة العالمية لرذاذ الكبريتات طالما وأن هذه الأخطاء مستدامة على مدى الزمن (Allen [et al.], 2000).



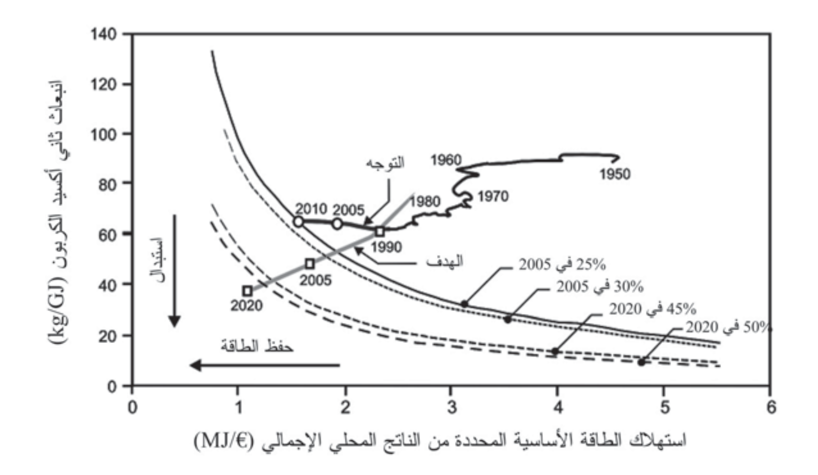
الشكل (1-7): الأضرار العالمية (بالبليون دولار أميركي) الناجمة عن الكوارث الطبيعية كدالة في الزمن (Munich Re 2005، وBerz 2003، وMünchn Rück 1996).

1 ـ 4 إجراءات خفض ثاني أكسيد الكربون

لمواجهة عواقب تراكم ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، قررت الحكومة الألمانية ـ والعديد من الحكومات الأخرى أيضاً ـ أن تُخفِّض من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة 50 في المئة بحلول عام 2020. وهذا لا يبدو قابلاً للتحقيق بالوسائل قيد الاستخدام (أي بزيادة كفاءة توليد القدرة الكهربائية فقط). وبالرغم من أن المطلب المحدد للطاقة الخام الذي يحقق ناتجاً وطنياً إجمالياً معيّناً تم خفضه بنجاح، إلاّ أن هذا الإجراء لوحده لن يلبي هدف الوصول إلى تخفيض 50 في المئة من الانبعاثات بحلول عام 2020. ويمكن تحقيق هذا الهدف فقط إذا أمكن توليد كمية كبيرة من الطاقة بانبعاث أقل من ثاني أكسيد الكربون. وفي المنظور البعيد المدى، فإن هذا يعني استبدال محطات القدرة العاملة بالوقود الإحفوري بمحوّلات طاقة متجددة. يبيّن الشكل (1–8) أن خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون يصبح أكثر فاعلية من خلال مجموعة من الإجراءات الاقتصادية واستبدال محطات القدرة الباعثة لثاني أكسيد الكربون. ووفقاً للأهداف المذكورة أعلاه، فإن محطات القدرة المستقبلية ينبغي أن تكون متجددة[2]. والطاقات المتجددة هي الخالية من الانبعاث، والمتوافرة بشكل غير محدود تقريباً، وتحمل تكاليف ثانوية مهملة، وميول كُلفتها استطرادي، ولها قبول اجتماعي جيد من قِبَل السكان. في هذا الكتاب، نناقش استخدام الفولتضوئية (Photovoltaic) لتوليد الطاقة الكهربائية كمثال مهم لتحويل الطاقة المتجددة.

---

(2) استخدام القدرة النووية لن يعتبر بديلاً وفقاً لما هو مذكور في مناقشة الفصل القادم.



الشكل (1-8): تخفيض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون باستنفاد استهلاك الطاقة وعن طريق استبدال مولد الطاقة الباعث بشدة لثاني أكسيد الكربون. ويبيّن الشكل أيضاً الأهداف من أجل تخفيض ثاني أكسيد الكربون.

1 ـ 5 مصادر الطاقة التقليدية والمتجددة

في الفقرة الآتية، مصادر الطاقة الإحفورية المبنية على الكربون (النفط، والغاز، والفحم الحجري) والقدرة النووية سيُصّنفان «كمصادر طاقة تقليدية».

الوقود الإحفوري هو نتاج عملية التمثيل الضوئي التي حدثت قبل عدة ملايين سنة. وببساطة، يمكن اعتبار الوقود الإحفوري بأنها ليست سوى مخازن للطاقة الشمسية أو للأشعة الشمسية. فقد استغرق أكثر من 100 مليون سنة للحصول على الأشكال الموجودة من الوقود الإحفوري، وبالتالي فإن تشكُّلها يُعتبر حدثاً جيولوجياً لمرة واحدة بكفاءة تحويل منخفضة جداً، انظر الجدول (1 ـ 3). ومن وجهة نظر الإنسان، فإن الموارد الإحفورية يُنظر إليها بأنها محدودة، فالمفهوم «متجددة» بالكاد ينطبق عليها.

الجدول (1 ـ 3): مقياس زمني لتحوّل الطاقة وكفاءات تحويل الطاقة الشمسية إلى حاملات طاقة مختلفة.

حامل الطاقة	زمن «إنتاج» الطاقة (سنة)	كفاءة تحويل الطاقة الشمسية	المرجع
فحم حجري، وليغنيت	أكثر من 150,000,000	أقل من 0.001 ٪	Bennewitz 1991
نفط، وغاز	أكثر من 100,000,000	أقل من 0.001 ٪	Bennewitz 1991
الخشب	30-1	1 ٪(3) 0.55 ٪ 0.1 ٪(4)	Kaltschmitt 2003 Kleemann 1993 Spreng 1995
تمثيل ضوئي للكتلة الحيوية	1 - 0.1	0.3 ٪ - 5 ٪(5) 0.04 ٪ - 1.5 ٪ 0.2 ٪(6)	Kleemann 1993 Kaltschmitt 2003 Spreng 1995
القدرة المائية	0.01 ـ 1.0	أقل من 1 ٪	
قدرة الرياح	باستمرار	0.25 ٪ 2 ٪	Hoagland 1996 Kleemann 1993
الفولتضوئية	باستمرار	6 ٪ ـ 25 ٪	Green 1995

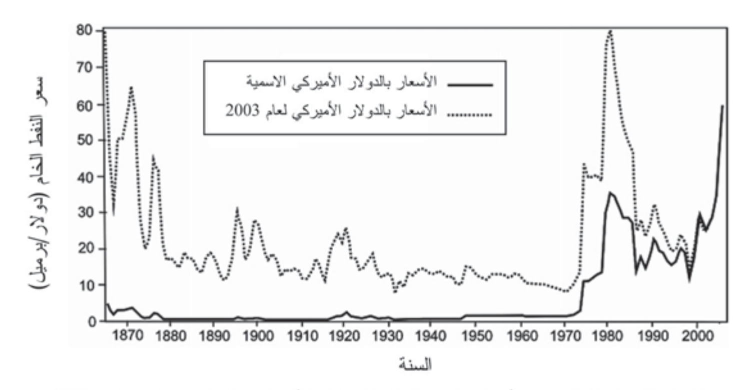
(3) أي خشب الزان: الإشعاعية ($3.7\ PJ/(km^2.a)$ أو $3.7 \times 10^{15}\ J/km^2.a$)، والتخزين ككتلة جافة فوق سطح الأرض: 570,000 Kg [240,000 Kg تحت سطح الأرض كجذور ودُبال (humus)).

(4) من متوسط الإشعاعية وكثافة نمو الغابة للمناخات المعتدلة.

(5) أقصى مردود شمس هو 5,4 في المئة لبنجر السكر (الشمندر) (وللأرض الزراعية بشكل عام: 0,3 في المئة).

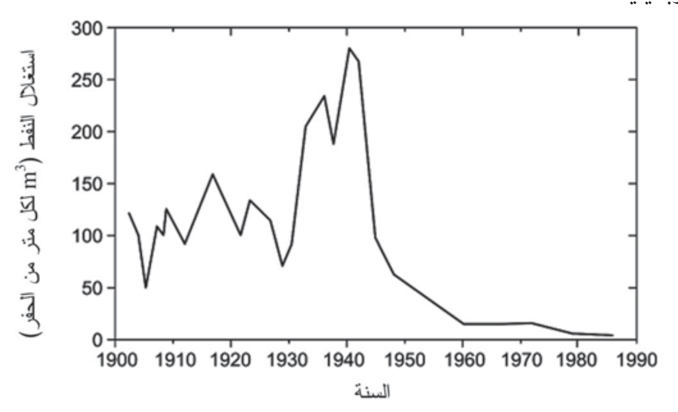
(6) التمثيل الضوئي المتعلق بالمتوسط العالمي.

ميزة السعر الحالي للوقود الإحفوري تبرر نفسها لاعتبارات سياسية ملائمة مثل حرب الأسعار للدول المصدّرة للنفط «أوبك» (OPEC)، و«شروطهم التجارية» تجاه دول الاستهلاك الرئيسة والمساعدات المالية المباشرة وغير المباشرة للوقود التقليدية. وتتم المساعدة المالية المباشرة بمنح إعانة مالية للاستكشاف، والتعدين، والنقل: مثلاً، للفحم الحجري والقدرة النووية في ألمانيا والديزل في البرازيل. وتتم المساعدة المالية غير المباشرة بفرض رسوم على السكان والحكومة من أجل تكاليف المتابعة (مثلاً، السيطرة على تلوث الماء والهواء، وتأمين إمداد النفط، وأمن النفايات النووية). على سبيل المثال، إجراءات تأمين إمداد النفط، مثل الوجود العسكري (مثلاً، في المملكة العربية السعودية) أو حتى التدخل المباشر (مثلاً، في العراق ـ الحرب الأخيرة هناك كلّفت دافعي الضرائب الأميركيين حوالى 300 بليون دولار أميركي). ومثال آخر: يفقد البلوتونيوم فقط 50 في المئة من نشاطه في 12500 سنة؛ إلاّ أن مراقبة ذلك على مدار 24 ساعة بواسطة حارس واحد فقط ستكلف 900 مليون دولار أميركي خلال هذا الزمن. وميول سعر الوقود الإحفوري في المدى المتوسط متقلب جداً، كما يبيّن الشكل (1–9)، ولكن كسلعة مقيدة بطلب ثابت (أو حتى متزايد)، فإن سعرها قد يزداد في المدى البعيد.



الشكل (1-9): التطور في أسعار النفط الخام بالدولار الأميركي (الاسمية وقيم عام 2003) خلال الـ 150 سنة الماضية.

يمكن ملاحظة سمة مثيرة في تطور السعر: في الفترة الزمنية نفسها عندما انخفض معدل استغلال حفر آبار النفط في الولايات المتحدة (إلى الصفر عملياً) في منتصف السبعينيات (انظر الشكل (1 ـ 10))، انفجر سعر النفط في السوق العالمية (انظر الشكل (1 ـ 9))، والتأثير الآخر المماثل (ولكن بحدَّة أقل) يمكن مشاهدته في منتصف الأربعينيات.



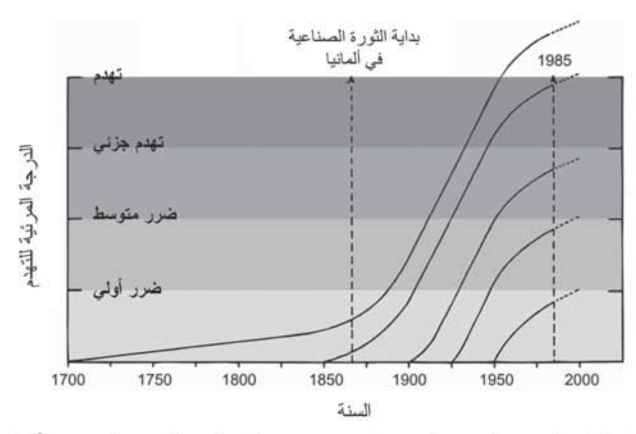
الشكل (1-10): معدل استغلال حفر آبار النفط في الولايات المتحدة منذ عام 1900.

يجب أخذ التأثيرات الاجتماعية الناجمة عن استخدام هذه المصادر للطاقة في الاعتبار أيضاً، مثل ارتفاع الأضرار الصحية (أمراض الجهاز التنفسي، والحساسيات. . . إلخ)، وأيضاً دمار الممتلكات الثقافية والبيئة (بسبب المطر الحمضي) (انظر Homeyer 1989). يتمثل الدمار الناجم عن ملوثات الهواء بالأضرار على المباني التاريخية والنصب التذكارية في ميونيخ (كما هو مبيّن في الشكل (1 ـ 11)): من عام 1700 إلى عام 1850، تم حساب الزمن المستغرق للزيادة بمقدار درجة واحدة للضرر بواسطة ملوثات الهواء ليكون أكثر من 300 سنة؛ وهذا المقدار انخفض فجأة إلى أقل من 50 سنة خلال الفترة ما بين عامي 1930 و1955. واليوم، الزمن المستغرق للزيادة بمقدار درجة واحدة للضرر هو ما بين 70 إلى 120 سنة، اعتماداً على زمن إنشاء المبنى. وهذا يعني تضاعف تكاليف الترميم مقارنة بما قبل 150 سنة، بالرغم من أن الملوثات قد تم خفضها إلى حد ما. التكاليف التراكمية للترميمات الإضافية للنصب الثقافية في ألمانيا هي 70 بليون دولار أميركي تقريباً لعام 2000. أما المباني التي لا تحوي قيماً ثقافية (البنايات، والجسور، والمنشآت الصناعية، وأبراج نقل الجهد العالي) فإن تكاليف الترميم الإضافية نتيجة للأضرار بواسطة ملوثات الهواء هي حوالى 4,1 بليون دولار أميركي كل عام في ألمانيا، وفقاً لدراسة «المعهد الاتحادي لأبحاث المادة» (BAM 1990).

يؤدي استخدام القدرة النووية إلى أنظمة فنية وإدارية (وأيضاً سياسية واجتماعية) غير قابلة للتغيير، ما تتناقض مع ثقافة الديمقراطية[7]. وتوضح دراسة من جامعة مونستر (Münster) (انظر

(7) النفايات النووية ذات الإشعاع العالي يبلغ عمرها النصفي عدة آلاف سنة (البلوتونيوم مثلاً: 12,500 سنة) ويجب حراستها والإشراف عيها بشكل موثوق على مدى معظم هذه الأعمار النصفية. والنظام الفني، والإداري، والعسكري الناتج فإنه غير قابل للتغيير حتى بالمطالبة الشعبية. وبالتالي فإن هذا النظام سيكون منيعاً للقواعد الديمقراطية.

(Ewers [et al.], 1991) تكاليف قدرها 2,35 تريليون دولار أميركي لحادثة قاسية في ألمانيا بواسطة مفاعل من نوع «بيبليس» (Biblis).



الشكل (1-11): أضرار المباني التاريخية في ميونيخ (ألمانيا) كدالة في الزمن وفقاً "لمكتب الحفاظ على النصب التاريخية لحكومة دولة بافاريا" (Bavaria). الرسم البياني بواسطة جريم وآخرون (Grimm [et al.] 1985).

التأمين الفعلي لهذه الحادثة محدد بـ 294 مليون دولار أميركي، وبالتالي فإن تكاليف التأمين تم التقليل من تقديرها بعامل يبلغ على الأقل ثمانية آلاف. وحيث إن استخدام هذا الشكل من الطاقة مختلف في الأساس عن جميع الأشكال الأخرى، وأيضاً غير قابل للمقارنة والتحقق منه لحظياً، فإن استخدام القدرة النووية سوف لن يؤخذ بالاعتبار لاحقاً في الحسابات.

1 ـ 6 تحويل الطاقة

نُشِرت أبحاث مختلفة حول احتياج الطاقة لمنشآت محطة القدرة والاعتمادات المالية المطلوبة للتشغيل بمصادر طاقة إحفورية ومـــجـــدَّدة ((1986) Aulich، و(1988) Schäfer، و(1988) Jensch،

و(Hagedorn (1989، و(Real (1991، و(Cap (1992، وSpreng (1995). . . إلخ). يبيّن الجدول (1 ـ 4) ملخصاً بالنتائج التي تم الحصول عليها، وانظر أيضاً الجدول (أ ـ 3) في الملحق. وواضح تماماً أنه خلال العقد الماضي، هبطت الانبعاثات النسبية للكهرباء الشمسية بواسطة الفولتضوئية من 318–230 g/kWh إلى 26–41 g/kWh بسبب التحسينات الكبيرة في تقنية الإنتاج واستخدام المواد. وتشير التطورات المتأخرة جداً، متأثرة بالعجز في التزوّد بالسيليكون، أنه سيجري تخفيض في السماكة المعيارية للرقاقة من 0.3 mm إلى 0.2 mm. وبهذا فإن القيم التي نشرت مؤخراً من قِبَل (Alsema [et al.], 2005) ربما سيتم تشغيلها بنقص 25 في المئة إلى 30 في المئة.

بالرغم من أن القيم المطلقة لمتطلبات الطاقة المحددة وانبعاثات غاز الدفيئة لتقنية الفولتضوئية قد تتغير مع مرور السنوات، إلاّ أن هذا الكتاب يجب أن يظل محتفظاً بقيمه، لأن طريقة الحسابات المقدمة سوف تبقى صحيحة في المستقبل. المزيد من المعلومات مقدَّمة في الفصول اللاحقة وفي الملحق.

في الماضي، حدث تعارض بشأن أزمان استهلاك دَيْن الطاقة (Energy Amortization Times). وفي الغالب، وقود التشغيل المطلوب مثل الوقود القابل للاحتراق لم يتم تضمينه في التقديرات. فمحطة قدرة بسيطة عاملة بالفحم الحجري، على سبيل المثال، حققت «زمن استهلاك دَيْن طاقة» بسنة واحدة، مقارنة بمحطة قدرة فولتضوئية بأربعة سنوات. على أيّ حال، باستعمال التعريف السابق، فإن مخيَّماً نارياً ابتدائياً على اليابسة سيكون له زمن استهلاك دَيْن أفضل من جميع محطات القدرة. وهذه هي الطريقة التي تم بها التشكيك (إما عن قصد أو عن جهل) بمصادر الطاقة المتجددة لفترة ما. وأيّ منشأة لتحويل الطاقة تعمل بالوقود القابل للاحتراق فإنها تمتلك زمن استهلاك دَيْن غير محدد! وكل منشأة لتحويل الطاقة

المتجددة يتم تشغيلها بوقود متجدد، وبالتالي ينبغي ألا تُؤخذ في الحسابات.

الجدول (1 ـ 4): انبعاث ثاني أكسيد الكربون لتحويل مصادر الطاقة الإحفورية والمتجددة إلى كهرباء (بالغرام من CO_2 لكل كيلووات. ساعة من الكهرباء) وفقاً لمراجع من عام 1999 إلى 2005.

المرجع الوقود	فانينجر[1] (Faninger) 1991	ستيلزر وآخرون[2] (Stelzer [et al.]) 1994	دي.بي. DB 1995	دي. بي[3] DB 1995 (مكافئ CO_2)	فوس Voß 1997	كالتشميت (Kalt-schmitt 2003 (مكافئ CO_2)	ألسيما وآخرون[4] (Alsema 2005 [et al.])
خشب	940						20
فحم كوك	960						
فحم السقاط	910						
فحم ليجنيت	890		1135.6	1146.6			
فحم حجري	860	840 ـ 830	917.7	1049.00	878.4 ـ 881.3	839	1000
نفط خفيف	720						
غاز طبيعي	480					399	400
قدرة الرياح		16.3 ـ 8.0	0.7	1.1	35.7 ـ 8.1	48 ـ 23	8
قدرة مائية		100	1.4	1.8		21 ـ 10	
فولتضوئية		300 ـ 230	51.7	61.2	318 ـ 206	279 ـ 123	41 ـ 26

1) تفاصيل فانينجر 1991 تستند إلى التفاصيل المتعلقة بوقود النفط الخفيف أو الغاز الطبيعي للمرجع كاب 1992.

2) التفاصيل من ستيلزر 1994 هي جزئية وتستند إلى دراسات أجريت في عام 1993.

3) لجنة المسح التابعة للبرلمان الألماني (المرجع: D B, 1995) أخذ في الاعتبار أيضاً ثاني أكسيد الكربون المكافئ لغازات المناخ الأخرى ذات الصلة. للفولتضوئية، أُخِذ في الاعتبار تكنولوجيا صناعة CdTe وفقاً للمرجع GEMIS 1992.

4) دورة حياة انبعاثات غاز الدفيئة ـ للخشب: يؤخذ في الاعتبار دورة حياة الكتلة الحيوية؛ وللشبكة الفولتضوئية المتصلة: فولتضوئية بإشعاع $1700\ kWh/(m^2a)$.

وفي ما يتعلق بتأثير الدفيئة، القضية الرئيسة هي ليست استهلاك الطاقة فقط، ولكن الانبعاث الفعلي لثاني أكسيد الكربون في أثناء دورة الحياة الكاملة لمحطة القدرة، ومكوناتها، وموادها، بما في ذلك إعادة التدوير. على سبيل المثال، بالرغم من أن إنتاج الألمنيوم له استهلاك طاقة أعلى من الفولاذ المقاوم للصدأ بمقدار عشرة أضعاف؛ ومع ذلك فإن هذا يمكن أن يكون مقبولاً، إذا ما تمّ توليد هذه الطاقة عن طريق مصادر طاقة متجددة (كما هو الحال في إنتاج الألمنيوم في الدول الاسكندنافية) ويتم إعادة تدوير الألمنيوم في ما بعد، وهو الأمر الذي يسمح باسترداد 90 في المئة من الطاقة المستخدمة، وبالتالي التقليل من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. (مثلاً في البرازيل، يتم إعادة تدوير 90 في المئة من علب الألمنيوم، انظر أيضاً الجدولين (8 ـ 1) و(8 ـ 2).

1 ـ 7 الطريقة المقترحة

الهدف من هذه الحسابات هو لدراسة كيف أن الاستخدام المكثف للمولدات الفولتضوئية يؤثر على الانبعاث البشري الصافي لثاني أكسيد الكربون. لتحقيق ذلك، يجب الأخذ في الاعتبار الدورة الكاملة للمولد الفولتضوئي، بما في ذلك عوامل مثل الإنتاج، والنقل، والتركيب، والاستخدام، والمردود الكهربائي، وجهود تفكيك النظام.

1-7-1 الإنتاج

بالإضافة إلى ملاحظة طرق الإنتاج الحديثة الحالية، يتم اختبار الإجراءات الأخرى التي تؤدي إلى الإنتاج الأكثر سلامة بيئياً للأنظمة الفولتضوئية. وهنا بشكل خاص، يعتبر خفض إنفاق الطاقة (عند المردودات نفسها) وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون أمراً حاسماً.

1 ـ 7 ـ 2 المردود

سيتم دراسة الطاقة الكهربائية المتولدة بواسطة محطة القدرة الفولتضوئية، مع الأخذ بعين الاعتبار جميع العوامل ذات الصلة مثل الموقع (الإشعاع، والفقد بالانعكاسات، والمناخات الدقيقة) والتفاعلات المحتملة لهذه العوامل.

1 ـ 7 ـ 3 التوازن

الخفض المحدد لثاني أكسيد الكربون من خلال استعمال نظام فولتضوئي سيتم دراسته بواسطة تحليل دورة الحياة (Life Cycle Analysis). فإلى جانب كونه طريقة ملائمة للإنتاج (تحقيق الحد الأدنى لدورتي الطاقة والمادة)، يجب أن يقوم النظام أيضاً برفع المردود من دون بذل جهد كبير، إن أمكن. الجديد في هذا الكتاب هو طريقة التحليل التكاملي لنظام كامل، مع الأخذ في الاعتبار أصل مكونات النظام مع تضمين إمكانية إعادة التدوير، وظروف التشغيل.

1 ـ 7 ـ 4 التحسين

الهدف هو تطوير أنظمة فولتضوئية محسَّنة مع الأخذ في الاعتبار البيئة الحقيقية والتأثيرات على التشغيل (الإشعاع، والانعكاس، ودرجة الحرارة الخارجية، وسرعة الرياح)، وعامل التفاعل لكل من المكونات على حدة مع تطلع نحو تحسين الفاعلية ذات الترجيح النشط. وعن طريق بناء نموذج، سيتم التحقق من الإفادات التي ذكرناها. كما سيتم دراسة إمكانيات الإنتاج الواسع والتأثير الناتج على توازن ثاني أكسيد الكربون.



الفصل الثاني

الفولتضوئية

الفولتضوئية هي التحويل المباشر للأشعة إلى كهرباء. وحيث إن الكهرباء تُستخدَم بشكل متزايد كمصدر للطاقة، فإن الفولتضوئية ستؤدّي دوراً مهماً في مجال الطاقات المتجددة. وتقنية الفولتضوئية هي عبارة عن أجزاء مركبة (أي إن الأنظمة الموجودة قابلة للتوسيع)، ولها عمر زمني طويل (تمنح المصانع ضمانة إلى حد 25 سنة)، وهادئة، وخالية من الانبعاثات في أثناء الاستخدام. وهناك احتمال كبير لانخفاض التكلفة بسبب تكنولوجيا أشباه الموصلات المعروفة؛ إضافة إلى ذلك، فإن عمليات الإنتاج الحالية يمكن جعلها تقنيات ذات كفاءة أكثر وتطوير أرخص للإنتاج الواسع. وبالرغم من وقتنا الحاضر (عام 2005)، إلاّ أن الأسعار في المصانع مستقرة عند حدود 3 ϵ/W_p بسبب قلّة السيليكون كمادة خام. ويُتوقع أنه بعد تشغيل منشآت الإنتاج الجديدة للسيليكون في عام 2006 فإن الأسعار ستنخفض مرة أخرى. وتشير المعلومات الأخيرة إلى أن تكاليف إنتاج ما بين 1 ϵ/W_p إلى 1.6 ϵ/W_p هي تكاليف محتملة.

2 ـ 1 نبذة تاريخية

تشتق الخلايا الشمسية أصلها من بعض التطورات العلمية المهمة جداً للقرن العشرين (Green, 2000)، التي تضم الأبحاث الفائزة بجائزة نوبل لعدد من علماء ذلك القرن المهمين جداً. بدأ

العالم الألماني ماكس بلانك (Max Planck) ذلك القرن منهمكاً في مشكلة محاولة تفسير طبيعة الضوء المنبعث من الأجسام الساخنة، مثل الشمس. كان عليه أن يضع فرضيات عن الطاقة في كونها مقيدة بمستويات منفصلة (Discrete Levels) بحيث تتوافق مع النظرية والتجارب المشاهَدة. هذا الأمر أثار حافز ألبرت أينشتاين (Albert Einstein)، في «سنته الإعجازية» لعام 1905، ليفترض بأن الضوء يتكون من «جسيمات» صغيرة، سُميت فيما بعد فوتونات (Photons)، لكل منها مقدار صغير جداً من الطاقة يعتمد على لون الفوتون. الفوتونات الزرقاء تمتلك حوالى ضعف طاقة الفوتونات الحمراء. وفوتونات الأشعة تحت الحمراء، غير المرئية للعين، تمتلك أيضاً طاقة أقل. وفوتونات الأشعة فوق البنفسجية، المسببة لضربة الشمس وسرطان الجلد، هي غير مرئية أيضاً إلاّ أنها تمتلك طاقة أعلى من الفوتونات الزرقاء، ما يفسر الضرر الذي تقوم به. قاد مقترح أينشتاين الجذري إلى صياغة وتطوير ميكانيكا الكم، التي تُوِّجت في عام 1926 بالمعادلة الموجية لإروين شرودنجر (Erwin Schrödinger). قام ويلسون (Wilson) بحل هذه المعادلة للمادة الصلبة في عام 1930. وأتاح له هذا الحل تفسير الاختلاف بين الفلزات، أي بين الموصلات الجيدة للكهرباء والعوازل؛ وأيضاً الصفات المميزة لأشباه الموصلات من حيث خصائصها الكهربية التي تتوسط الموصلات والعوازل. والإلكترونات، حاملات الشحنة الكهربية، حرة الحركة خلال المادة، ما يسمح للتيارات الكهربائية بأن تتدفق بسهولة. وفي المواد العازلة، الإلكترونات مقيدة بروابط تربط ذرات المادة العازلة مع بعضها. وهي تحتاج إلى طاقة عالية لتحريرها من هذه الروابط بحيث تصبح حرة الحركة. وهذا ينطبق أيضاً على أشباه الموصلات، باستثناء أن إلكتروناتها تحتاج إلى طاقة أقل لتتحرر ـ وحتى الفوتونات الحمراء في ضوء الشمس لها طاقة

تكفي لتحرير إلكترون في شبه موصل أساسي، مثل السليكون. اكتشف رسِّل أوهل (Russell Ohl) الخلية الشمسية السليكونية الأولى بالصدفة في عام 1940. وكان مندهشاً لقياسه جهداً كبيراً مما كان يعتقد بأنه لقضيب سليكون نقي عندما كان يضيء مصباحاً عليه. وبالبحث الدقيق تبيّن أن تركيزاً صغيراً من الشوائب كانت تعطي أجزاء من السليكون خصائص تدعى «سالبة» (نوع ـ س) (*n*-type). هذه الخصائص تعرف اليوم بأنها نتيجة فائض من الإلكترونات المتحركة بشحناتها السالبة. ومناطق أخرى من السليكون كان لها خصائص «موجبة» (نوع ـ م) (*p*-type)، وتعرف اليوم بأنها نتيجة نقص إلكترونات، مسبِّبة تأثيراً مشابهاً لفائض من الشحنات الموجبة (وهو شيء قريب من دليل فيزيائي لبديهية رياضية بأن سالبين ينتجان موجباً).

بحث ويليام شوكلي (William Shockley) في نظرية الأجهزة المكونة من وصلات بين المناطق «الموجبة» و«السالبة» (وصلات م ـ س) (*p-n* junctions) في عام 1949، وعلى الفور استخدم هذه النظرية لتصميم الترانزستورات العملية الأولى. تبع ذلك ثورة أشباه الموصلات في الخمسينيات، التي نتجت عنها أيضاً الخلايا الشمسية الفعالة الأولى في عام 1954. وهذا الحدث أدى إلى ابتهاج هائل وغزا العناوين الرئيسة للصفحات الأولى آنذاك.

أول استخدام تجاري للخلايا الشمسية الجديدة كان على مركبة فضائية بداية في عام 1958. وكان هذا هو التطبيق التجاري الرئيس حتى مطلع السبعينيات، عندما حفز الحظر على النفط في تلك الفترة إعادة اختبار إمكانية الخلايا الشمسية للمنازل. ومن البدايات الأولى، تأصلت صناعة الخلية الشمسية الأرضية في هذا الوقت ونمت بشكل سريع، وخصوصاً خلال السنوات القليلة الماضية. والعزم الدولي

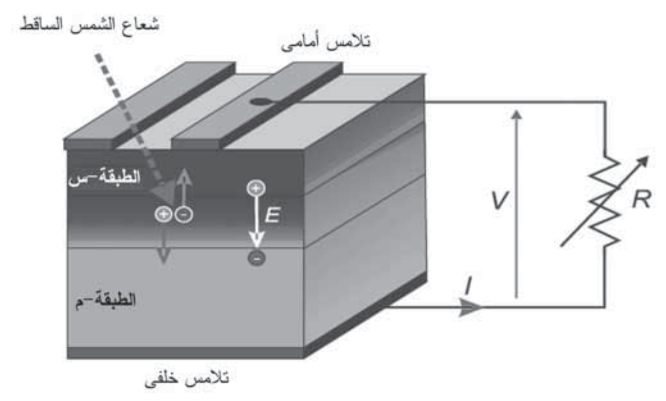
المتزايد للخفض من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون كخطوة أولى للسيطرة على «ظاهرة الدفيئة»، مع تكاليف الخلية المنخفضة، ترى الصناعة مستعدة لإحداث تأثير متزايد في مدى العقدين الأولين من الألفية الجديدة.

2-2 التأثير الفولتضوئي

الخلية الشمسية هي عبارة عن دايود شبه موصل ذي مساحة كبيرة. وهي تتكون من وصلة م ـ س مصنّعة بإضافة مادة شائبة (إشابة (Doping)) إلى بلورة شبه الموصل (المحتوية على أربعة روابط تساهمية للذرات المتجاورة للخلايا الشمسية السليكونية المستخدمة بشكل شائع). إذا كانت المواد الشائبة هي ذرات الفوسفور، التي لها خمسة إلكترونات خارجية، فإنه يتطلب فقط أربعة إلكترونات لتنطبق الذرة الشائبة في التركيب البلوري للسليكون، ويبقى الإلكترون الخامس فائضاً حر الحركة. وبالتالي، يوجد في هذه المنطقة من البلورة عدد كبير (غالبية) من الشحنات الحرة السالبة، وبهذا تسمى هذه المنطقة السالبة بالمنطقة ـ س (*n*-region). والعكس صحيح للمنطقة الموجبة، المنطقة ـ م (*p*-region): بإشابة البلورة بمواد شائبة من ذرات البورون، التي لها ثلاثة إلكترونات خارجية، يصبح إلكترون واحد مفقوداً دائماً لتكملة الرابطة في التركيب البلوري للسليكون. هذا الإلكترون يمكن «اقتراضه» من الذرات المجاورة، وبالتالي يتزحزح موقع الإلكترون المفقود. هذا الإلكترون المتزحزح يمكن أيضاً اعتباره «فجوة» (Hole) بشحنة موجبة متحركة ومتنقلة. ويوجد عدد كبير جداً من الفجوات الحرة أكثر من الإلكترونات الحرة في المناطق ـ م، وبهذا تسمى الإلكترونات في هذه المنطقة بحاملات الشحنة الأقلية، بينما تسمى الفجوات بحاملات الشحنة الأغلبية.

نتيجة الاختلافات في تركيز الشحنات عند الحد الفاصل بين المنطقتين، تنتشر الإلكترونات إلى المنطقة ـ م والفجوات إلى المنطقة ـ س، وبالتالي ينشأ مجال كهربي في الوصلة التي كانت متعادلة كهربياً سابقاً (انظر الشكل (2–1)): نمو منطقة فراغ الشحنة (space-charge region). تستمر هذه المنطقة بالنمو إلى أن تقوم بإيقاف المزيد من الانتشار الفعلي لحاملات الشحنة.

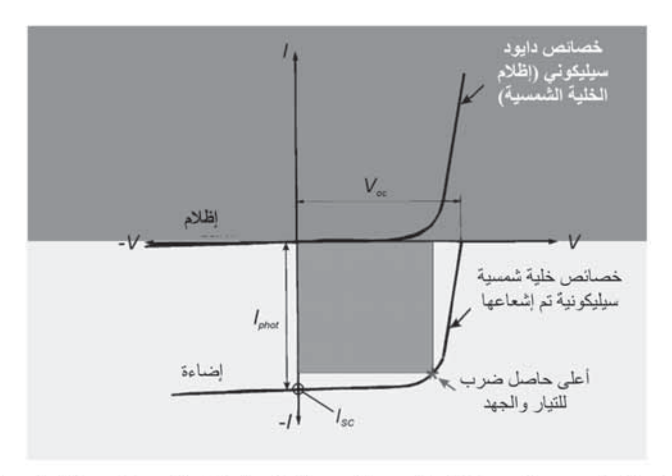
الضوء (أو الشعاع الشمسي) الساقط على شبه الموصل يولِّد أزواجاً من الإلكترونات والفجوات، مؤدياً إلى زيادة تركيز حاملات الشحنة الأقلية بعدة مقادير. تنتشر حاملات الشحنة هذه إلى منطقة فراغ الشحنة وتنقسم بواسطة المجال الكهربي هناك. ويمكن اكتشاف جهد V بين تلامس الجانب ـ س والجانب ـ م، كما هو مبيّن في الشكل (2 ـ 1). وعند تطبيق مقاومة حِمل R، يتدفق تيار I خلال التلامس، وتتبدد القدرة الكهربائية.



الشكل (2-1): رسم توضيحي لفكرة تحويل الطاقة الفولتضوئية في شبه موصل مطعّم س–م. القدرة الكهربائية المتولدة يتم توصيلها إلى مقاومة أومية R.



الشكل (2-2): منظر أمامي لخلية شمسية سيليكونية متعددة البلورة مربعة مقاس 10 cm × 10 cm.



الشكل (2-3): خصائص التيار–الجهد لدايود (إظلام الخلية الشمسية) وخلية شمسية تم إشعاعها مع تيار دائرة القِصَر I_{sc} وجهد الدائرة المفتوحة V_{oc}.

الخاصية المميزة للخلية الشمسية من دون أيّ إشعاعية (خاصية الإظلام) تتوافق مع الخاصية المميزة للدايود[1]، كما هو مبين في

(1) لقياس خصائص الإظلام، يتطلب مصدر جهد كهربائي متغير خارجي.

الشكل (2 ـ 3). وعند سقوط الأشعة على الخلية الشمسية، تتزحزح هذه الخاصية بمقدار التيار الضوئي I_{photo} في الاتجاه المانع لمرور التيار (خاصية الإضاءة). ويتم إيجاد هذه الخاصية للخلية الشمسية بتوصيل مقاومة حِمل متغيرة إليها (انظر الشكل (2 ـ 1)) والرسم بيانياً بين التيارات والجهود الكهربية الناتجة لقيم مختلفة للأحمال.

تيار دائرة القِصَر I_{sc} (short-circuit) هو أحد الخصائص المهمة جداً للخلية الشمسية. ويحدث هذا التيار في الخلية الشمسية ذات دائرة القِصَر التي سقطت عليها الأشعة. جهد الدائرة المفتوحة V_{oc} (open-circuit): يمكن وصف الجهد بين التلامسات إذا لم يؤخذ أيّ تيار (دائرة مفتوحة). والقدرة الكهربائية النظرية الممكن إحرازها (المثلى)، التي يمكن أخذها من النقطة الطرفية، P_{opt}، هي حاصل ضرب تيار دائرة القِصَر I_{sc} وجهد الدائرة المفتوحة V_{oc}، أي إن:

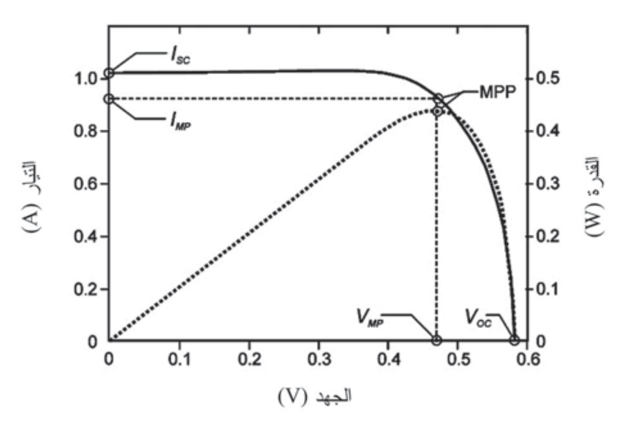
$$P_{opt} = I_{sc} \cdot V_{oc} \qquad (1)$$

وتُعرَّف القدرة الكهربائية القصوى، P_{max}، بأنها الناتج الأعلى من حاصل الضرب بين V و I عند نقطة التشغيل، أي إن:

$$P_{\max} = P_{mp} = I_{mp} \cdot V_{mp} \qquad (2)$$

وتعطى «نقطة القدرة القصوى» (Maximum Power Point (MPP)) بحاصل الضرب بين النقطة القصوى للتيار، I_{mp}، والنقطة القصوى للجهد، V_{mp}.

النسبة بين P_{max} إلى P_{opt} تسمى عامل التعبئة FF (fill factor)، وتصف «مستطيلية» مسار الخاصية. ويبيّن الشكل (2 ـ 4) القدرة P كدالة في الجهد V والخاصية المقابلة I-V.



الشكل (2-4): خصائص التيار ــ الجهد وخصائص القدرة ــ الجهد لخلية شمسية سليكونية. ويبيّن الشكل أيضاً نقطة القدرة القصوى (MPP) عند V_{mp} و I_{mp}.

تُعرَّف كفاءة التحويل الفولتضوئي η_{PV} بأنها النسبة بين القدرة الكهربائية الخارجة إلى القدرة التي تم إشعاعها على الخلية الشمسية. وتعتمد η_{PV} على الإشعاعية والطيف. ويتم إيجاد كفاءة التحويل تحت ظروف فحص معيارية (standard test conditions) (STC): إشعاعية قدرها $1000\ W/m^2$ عمودية على السطح الأمامي، ودرجة حرارة 25^oC للخلية، وتوزيع طيفي وفقاً للإشعاعية الشمسية المارة بزاوية ارتفاع 41.8^o خلال الغلاف الجوي (بكتلة هوائية (Air Mass 1,5). ولأسباب فيزيائية، فإن كفاءة التحويل الفولتضوئي لها حد أعلى نظري. ويبلغ هذا الحد الأعلى النظري 28 في المئة تقريباً لبلورة السليكون وله ثلاث مسببات رئيسة:

1 ـ السليكون معروف بأنه شبه موصل غير مباشر. هذا يجعل امتصاص الفوتون يعتمد على ظهور الفوتون (الاهتزاز الشبيكي) ـ وحيث إن هذا يحدث نسبياً بشكل نادر، فإن معامل امتصاصه منخفض نسبياً.

2 ـ طاقة شريط الفجوة للسليكون مقدارها 1,1 eV: الفوتونات ذات الطاقة الأقل لا يتم امتصاصها إطلاقاً، بينما الفوتونات ذات الطاقة

الأعلى تقوم بتحويل الفائض من الطاقة إلى فوتونات كاهتزازات شبيكية، أي على شكل حرارة. هذه العملية، وعمليات الفقد الإضافية أيضاً، تعرِّف ما يسمى بـ «الحساسية الطيفية» أو «الاستجابة الطيفية» للخلية الشمسية (انظر أدناه).

3 ـ الجهد الكهربائي الأقصى (جهد الدائرة المفتوحة) V_{OC} يعتمد على فرق الجهد المعطى بواسطة الانتقال م ـ س ويبلغ مقداره تقريباً 0.7 للسليكون.

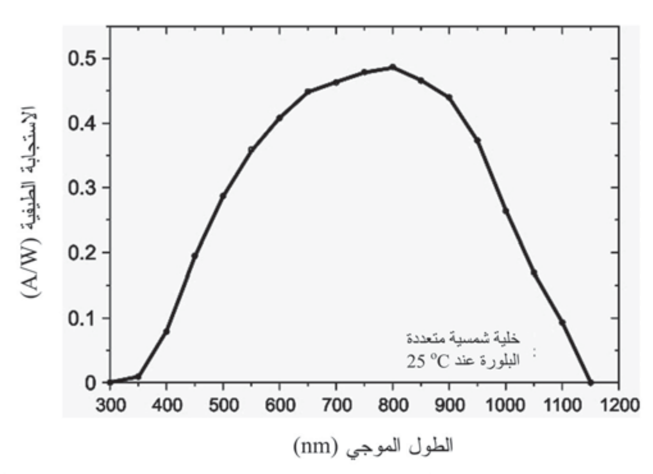
كفاءة التحويل النظرية هذه تنخفض في الحقيقة بآليات فقد مختلفة تتضمن:

- عمليات الفقد الضوئية، مثل الفقد بالانعكاس والتظليل الناتجان من التلامسات الأمامية والفقد بالإشعاعية غير الممتصة (النافذة) أيضاً.
- عمليات الفقد الأومية من المقاومات المتصلة على التوالي (عن طريق التلامسات والمقاومة الصفحية (Sheet Resistance)) وعن طريق المقاومات الطفيلية المتصلة على التوازي (انظر الشكل (2 ـ 12)).
- عمليات الفقد بإعادة الاتحاد (Recombination).

إمكانية الخلية الشمسية على تحويل فوتون ساقط بطول موجي معيّن إلى زوج من الإلكترون والفجوة تسمى «كفاءة كميَّة» (Quantum Efficiency). وتقوم «الكفاءة الكمية الداخلية» بإهمال الفقد بالانعكاس على سطح الخلية الشمسية، بينما تقوم «الكفاءة الكمية الخارجية» بتضمينها.

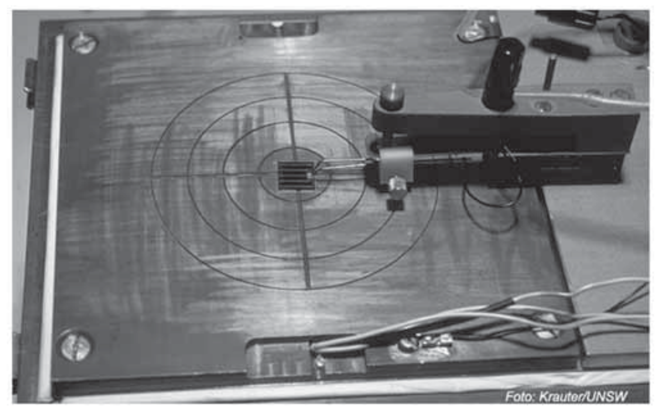
بالرغم من أن طاقة الفوتونات (أو «كمّات» الطاقة (Quanta)) تزداد مع زيادة ترددها (طبقاً لقانون ماكس بلانك)، إلاّ أن كلاً منها يقوم عادة بإيجاد زوج واحد فقط من الإلكترون والفجوة بإمكانية طاقة ثابتة. لهذا، فإن الكفاءة الطيفية (Spectral Efficiency)، المعرَّفة بالنسبة بين الطاقة الكهربية الخارجة إلى الطاقة الإشعاعية، تنخفض كلما قلّت الأطوال الموجية. وأفضل كفاءة طيفية تحدث عندما يصبح مقدار الطاقة الناتج

من الفوتون الساقط كافياً فقط لإيجاد زوج واحد من الإلكترون والفجوة. وإذا كانت طاقة الفوتون ليست كافية لإيجاد زوج واحد من الإلكترون والفجوة، فإن التأثير الفولتضوئي يساوي صفر ـ وهذا يحدث عند الأطوال الموجية الأكبر من 1100 nm للخلايا الشمسية السليكونية. ونتيجة الشوائب الموجودة في بلورة السليكون، فإن الخاصية الطيفية الحقيقية تختلف إلى حد ما عن الخاصية المثالية المذكورة أعلاه، وبالتالي يجب قياسها. وما يسمى بـ «الحساسية الطيفية» (Spectral Sensitivity) أو «الاستجابة الطيفية» (Spectral Response) S(λ) للخلية الشمسية، كما هو مبيّن في الشكلين (2 ـ 5) و(2 ـ 7)، تُعرَّف بكثافة الفوتون $j_{phot}(\lambda)$ مقسومة على شدة الإشعاع الساقط (الإشعاعية) $E(\lambda)$ أو $G(\lambda)$. ويتم إيجاد الكفاءة الطيفية بقياس استجابة الخلية الشمسية للتضمين (Modulation) عند طول موجي معيّن. وتُجرى القياسات من خلال إشعاع طيف انحيازي (مثلاً، بكتلة هوائية AM 1.5) وذلك لتفادي تأثيرات الاضطراب الناتجة من مستوى الإشعاعية. ومثل هذا الجهاز مبيّن في الشكل (2 ـ 6).

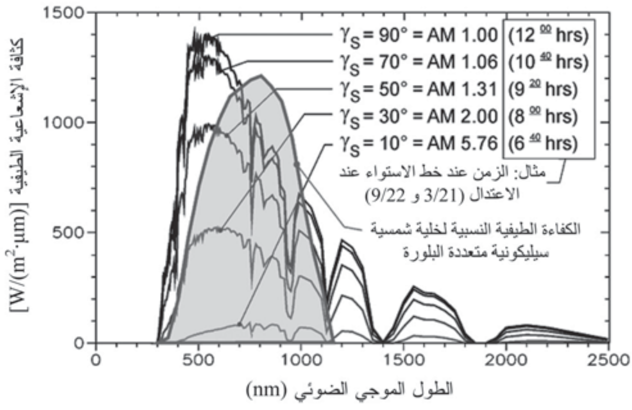


الشكل (2-5): الاستجابة الطيفية الفعلية لخلية شمسية سليكونية متعددة البلورة (نوع ASE).

التوزيع الطيفي المحدد لأشعة الشمس على سطح الأرض يعتمد على سماكة وظروف الغلاف الجوي الذي تمر من خلاله الأشعة. وإلى حد ما، تعتمد الكفاءة والقدرة الخارجة للخلايا الشمسية على هذه الظروف أيضاً (انظر الشكل (2 ـ 7)، والمعلومات الإضافية في الفصل السابع).



الشكل (2-6): جهاز لقياس خصائص التيار–الجهد (*I-V*)، والكفاءة، والاستجابة الطيفية. والشكل مبيَّن مع خلية شمسية ذات كفاءة عالية في جامعة نيو ساوث ويلز (UNSW).

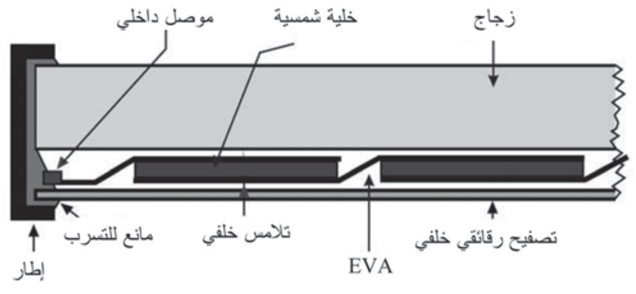


الشكل (2-7): الاستجابة الطيفية الفعلية لخلية شمسية متعددة البلورة (نوع ASE) مع الطيف الشمسي لزوايا ارتفاع مختلفة للشمس، والكتل الهوائية المكافئة (AM)، والزمن عند خط الاستواء للاعتدال.

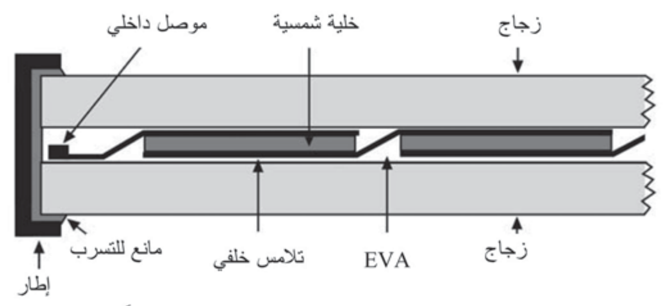
2 ـ 3 المولّد الفولتضوئي

المجال الكهربي الداخلي في الخلية الشمسية ضعيف نسبياً ويمكن فقط تحقيق فروق صغيرة في الجهد الكهربي (0.3 V للجرمانيوم و0.7 V للسليكون). والجهد الفعلي للدائرة المفتوحة الذي يمكن تحقيقه هو أقل بقليل من هاتين القيمتين. للحصول على جهود كهربية أعلى، يتم توصيل الخلايا الشمسية على التوالي ـ بما تسمى بـ «سلاسل» من الخلايا الشمسية.

ولأن هذه السلاسل قابلة جداً للكسر، يتم عادة إدراجها في شطيرة بلاستيكية وزجاجية ناعمة فتكوِّن ما يسمى بـ «المنظومة الشمسية» أو «المنظومة الفولتضوئية». والبلاستيك الشفاف الناعم أعلى وأسفل سلاسل الخلية هو عادة البوليمر المشترك أسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين (EVA)، إلاّ أن الخيارات الممكنة أيضاً هي البيوتيرال متعدد الفينيل (PVB)، أو السليكونات، أو البلاستيك الحراري متعدد اليوريثين (TPU)، وهو تطوير حديث جداً. ومن أجل تصلب المركب وجعله متيناً يتم إضافة زجاج أمامي معالج. وإذا كانت الجهة الخلفية تتكوّن من رقاقة مركّبة (تحتوي على مجموعة من الطبقات مثل PVF ـ ألمنيوم ـ PVF أو PVF ـ بوليستر ـ PVF، حيث PVF هو الفلوريد متعدد الفينيل)، فإننا نسميها «منظومة مصفحة» (Laminated) (انظر الشكل (2 ـ 8))؛ وإذا كانت الجهة الخلفية زجاج، فإننا نسميها «منظومة مغلّفة» (Encapsulated) (انظر الشكل (2 ـ 9)).



الشكل (2-8): مقطع عرضي لخلية فولتضوئية مصفحة.



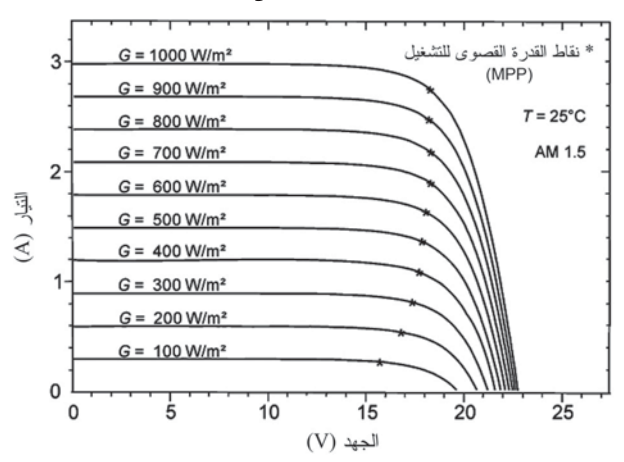
الشكل (2-9): مقطع عرضي لخلية فولتضوئية مغلَّفة.

يتم تهيئة الجهد الخارج عند ظروف الدائرة المفتوحة لمثل هذه المنظومة الفولتضوئية عادة بين 17 V إلى 35 V للتطبيقات غير المرتبطة بالشبكة، التي تسمح بالشحن الكامل لبطارية 12V (و24V في حال الربط على التوالي)، وبالتالي يتطلب 36 إلى 72 خلية موصلة على التوالي. وتُستكمَل المنظومة بإلحاق صندوق طرفي صغير يحتوي على نقاط طرفية كهربائية وإطار معدني أو بلاستيكي يساعد على تركيب المنظومة ويوفر لها صلابة إضافية.

2 ـ 3 ـ 1 الخصائص الكهربية

الخصائص الكهربية المميزة للمنظومة الفولتضوئية يشار إليها من خلال بعض الخصائص للعلاقة بين التيار والجهد، كما هو الحال في

الخلايا الشمسية (الشكلان (2 ـ 3) و(2 ـ 4)). بتوصيل حِمل أومي (Variable Ohmic Load) متغير إلى طرفي المنظومة الفولتضوئية التي يتم إشعاعها، يمكن تسجيل مجموعة من التيارات والجهود الكهربية التي تعطينا المنحنى *I-V* عند تغيير الحِمل.



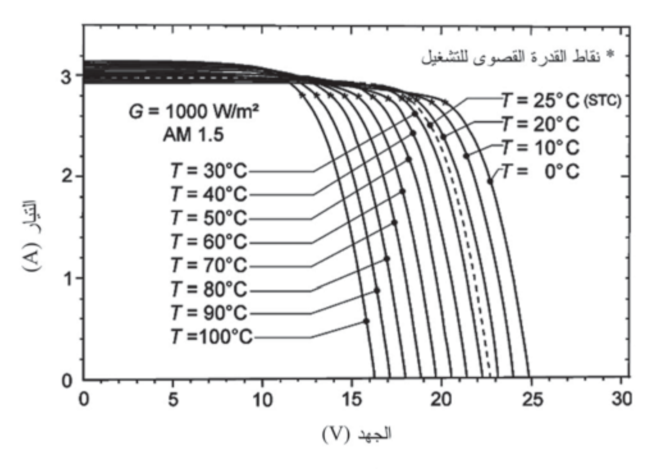
الشكل (2-10): خصائص التيار–الجهد لمنظومة فولتضوئية سليكونية متعددة البلورة لقيم إشعاعية مختلفة (مع ثبات درجة الحرارة والطيف عند 25 °C و AM 1.5).

مضاعفة أزواج المنحنى *I-V* يؤدي إلى قدرة كهربائية خارجة تصل إلى أعلى قيمة لها عند النقطة المسماة بنقطة القدرة القصوى (MPP). ولجعل البيانات متماثلة، فقد تم إعداد «ظروف الفحص المعيارية» كالآتي: تثبيت الطيف وربطه بطيف الشمس عند الكتلة الهوائية AM5.1، والإشعاعية عند $1000\ W/m^2$، ودرجة حرارة تشغيل الخلية عند 25 °C (للنظامين المعياريين (IEC 904-1 وIEC 891)، وأيضاً (DIN EN 60904-1 وDIN EN 60891)، وانظر أيضاً الجدول (أ ـ 19أ) في الملحق). تغيُّر الإشعاعية E (أو G) له تأثير بسيط فقط في جهد الدائرة المفتوحة للمنظومة الفولتضوئية يتراوح ما بين 350 إلى $1000\ W/m^2$. وفي المستويات المنخفضة للإشعاعية، ينخفض الجهد لوغاريتمياً (انظر الشكل (2 ـ 10)). ويتناسب تيار دائرة القِصَر طردياً مع

الإشعاعية لأن التيار يساوي عدد أزواج الإلكترونات والفجوات المتولدة بواسطة الفوتونات التي يتم امتصاصها. وبالتالي، فإن القدرة الخارجة المحتملة للمولد الفولتضوئي تتناسب مع الإشعاعية في المدى من 350 إلى $1000\ W/m^2$ (كفاءة تحويل ثابتة).

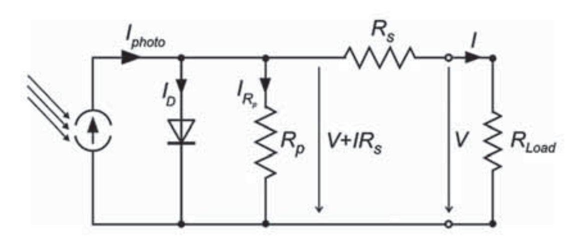
للمستويات المنخفضة للإشعاعية، تنخفض كفاءة التحويل نتيجة الفقد في الجهد الذي يعتمد على مقاومة مجزِّئ التيار الداخلية (مقاومة متصلة على التوازي (Shunt Resistor)). والخلايا الشمسية التي بمقاومة عالية لمجزِّئ التيار تعتبر ملائمة لمستويات الإشعاعية المنخفضة أكثر من الخلايا الشمسية التي بمقاومة منخفضة لمجزِّئ التيار (وهذا ينتج أساساً بسبب المواد الشائبة في مادة الخلية الشمسية).

زيادة درجة حرارة الخلية الشمسية عند ثبات الإشعاعية تؤدي إلى خفض جهد الدائرة المفتوحة وبالتالي إلى انخفاض القدرة الخارجة بمقدار 0.4- في المئة K، إلى 0.5- في المئة K، لبلورة الخلية الشمسية السليكونية (انظر الشكل (2 ـ 11)).



الشكل (2-11): خصائص التيار–الجهد لمنظومة فولتضوئية سليكونية متعددة البلورة عند درجات حرارة مختلفة (مع ثبات الإشعاعية والطيف عند $1,000\ W/m^2$ و AM 1.5).

2 ـ 3 ـ 1 ـ 1 الدائرة الكهربية المكافئة



الشكل (2-12): رسم توضيحي للدائرة الكهربية المكافئة لخلية شمسية وفقاً لــ "نموذج الدايود الواحد".

خصائص التيار ـ الجهد لخلية شمسية متمثلة بـ «نموذج الدايود الواحد» (انظر الشكل (2 ـ 12) الذي يوضح الدائرة الكهربية المكافئة) يمكن وصفها على النحو الآتي:

$$I = I_{photo} - I_0\left[\exp\frac{q(V + I\,R_s)}{kT} - 1\right] - I_{R_p} \qquad (3)$$

$$R_p = R_{p.dark}\cdot e^{-\alpha E} \qquad (4)$$

$$I_{R_p} = \frac{V + I\,R_S}{R_p}\left[1 + a\left(1 - \frac{V + I\,R_s}{V_{br}}\right)^{-m}\right] \qquad (5)$$

وخصائص التيار ـ الجهد لمنظومة فولتضوئية يمكن وصفها على النحو الآتي:

$$I = I_{photo} - I_0\left[\exp\frac{q\left(\sum V + I\,R_s\right)}{kT} - 1\right] - I_{R_p} \qquad (6)$$

حيث:

a	عامل المضاعفة	q	الشحنة الأولية (1.602×10^{-19} A.S.)
E	الإشعاعية (W/m^2)	R_p	مقاومة التوازي (Ω)
I_0	تيار التشبع للدايود (A)	R_s	مقاومة التوالي (0,05 إلى 0,5Ω)
I_{photo}	التيار الضوئي (A)	T	درجة الحرارة المطلقة (K)

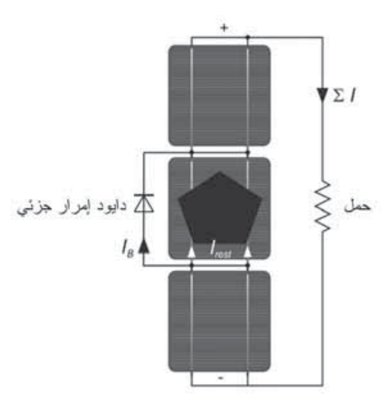
I_{Rp}	تيار المقاومة التي على التوازي (A)	V_{br}	جهد الانهيار (V)
k	ثابت بولتزمان (1.381×10^{-23} J/K)	α	معامل اعتماد الإشعاعية على R_p في (m^2/W)
m	أُس المضاعفة		

عادة، يُفترض أن تظل المقاومة المتصلة على التوازي ثابتة. إلاّ أن 1995 (Zimmermann) يعطي للمعامل α قيمة نموذجية 1.69×10^{-3} W/m^2، وبالتالي تكون مقاومة التوازي R_p قيمتها 350 Ω في حالة الإظلام، وعند الإشعاعية بمقدار 1000 W/m^2 تنخفض قيمة هذه المقاومة إلى 70 Ω. يبيّن الجدول (2 ـ 1) معاملات درجة الحرارة المقاسة لبعض المنظومات الفولتضوئية السليكونية.

2 ـ 3 ـ 1 ـ 2 دايودات الإمرار الجزئي

مثل جميع توصيلات التوالي (مثلاً، في البطاريات أو الفولتضوئية)، العنصر ذو التيار الأقل هو الذي يحدد التيار الكلي. ولتفادي الفقد، يتم فقط اختيار خلايا بتيارات متكافئة عند جهد التشغيل من أجل توصيل التوالي. وأيضاً، تيار الخلية قد ينخفض بالتظليل الموضعي (مثلاً نتيجة الغبار على سطح المنظومة)، ما يحد بالتالي من التيار الكلي والقدرة الخارجة. وإذا كانت سلسلة الخلايا كبيرة بما يكفي، فإن الجهد (العكسي) في الخلية المظللة يمكن أن يفوق جهد الاختراق السالب فيؤدي إلى تبدد موضعي للقدرة والذي يمكن أن يتلف الخلية. للتغلب على هذه المشكلة، يتم توصيل «دايودات إمرار جزئي» (Bypass Diodes) على التوازي (في اتجاه مضاد للخلية الشمسية، غالباً ما تسمى أيضاً «مضاد التوازي») إلى الخلايا الشمسية أو إلى سلسلة صغيرة من الخلايا الشمسية (كما هو مبيّن في الشكل (2 ـ 13)). فعندما ينخفض تيار أيّ خلية بالتظليل، ينشأ جهد عكسي في الخلية (بافتراض أن الحِمل متصل) إلى أن

يفوق الجهد العكسي جهد الاختراق لدايود الإمرار الجزئي وبالتالي يتدفق جزء من التيار الكلِّي خلال دايود الإمرار الجزئي، بينما تستمر التيارات الباقية I_{rest} مارة خلال الخلية.



الشكل (2-13): رسم تخطيطي يوضح تشغيل دايود الإمرار الجزئي: خلية شمسية مع تظليل جزئي في سلسلة مكوّنة من 3 خلايا متصلة على التوالي.

والطرق الأخرى للتغلب على هذه المشكلة هي استخدام جهد اختراق عكسي منخفض لدايودات الخلية الشمسية (مثلاً، في الخلايا الشمسية المتعددة البلورة)، أو استخدام دايود إمرار جزئي مدمج مع الخلية (Green 1980): «الخلايا الشمسية المدمجة ودايودات التوازي» (Integrated Solar Cells and Shunting Diodes)، براءة اختراع أسترالية رقم 524,519؛ وبراءة اختراع أميركية رقم 4,323,719).

2 ـ 3 ـ 1 ـ 3 النقاط الطرفية الكهربائية

الأسلاك الخارجة من سلاسل الخلية تمر خلال تصفيح المنظومة وتثبت بواسطة واقي الشد. يتم بعد ذلك توصيل الأسلاك إلى خط تمديد أو إلى نهاية صندوق بلاستيكي متصل بنقطة طرفية قابلة لوضع قابس (مأخذ) أو مسمار لولبي. تأتي المنظومات الحديثة

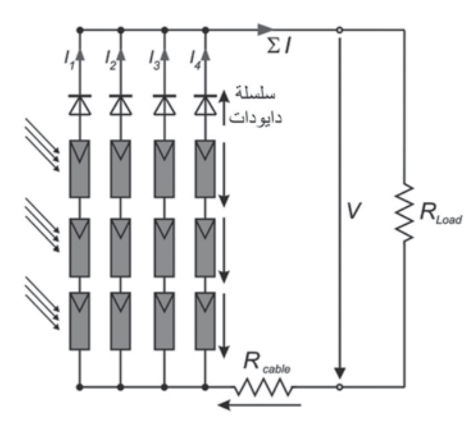
مجهزة مسبقاً بكابلات خارجية مع مآخذ مقاومة للعوامل الجوية يتم إضافتها إلى التوصيل الداخلي في المنظومة ما يخفض من زمن التنصيب. كما يتم دمج دايودات إمرار جزئي في الإطار أو تركيبها في الصندوق الطرفي.

2 ـ 3 ـ 1 ـ 4 السلاسل المتصلة على التوازي

عندما تزداد كفاءة مكونات تكييف القدرة (مثل العاكسات (inverters)) مع زيادة الجهد، يتم توصيل المنظومات على التوالي. في بعض البلدان (الولايات المتحدة مثلاً)، يحدد قانون السلامة أقصى جهد ليكون 600V (500V شاملاً عامل الأمان). للمقاسات الشائعة جداً للخلايا (10 cm في 10 cm إلى 15 cm في 15 cm)، فإن هذا يعني قدرة مُخرجة قصوى بين $2\ kW_p$ إلى $3\ kW_p$.

لإحراز قدرات مُخرجة أعلى من دون تجاوز الجهد الأقصى V 600 (أو للحصول على تيارات عالية)، يتم توصيل المنظومات (أو سلاسل المنظومات) على التوازي. وفي حال وجود عطل، مثل انخفاض الجهد في أيّ سلسلة، مثلاً، نتيجة ارتفاع درجة الحرارة أو بواسطة خلية مظللة (يقل الجهد أيضاً عند استعمال دايود إمرار جزئي)، فإن بقية السلاسل تحاول «تغذية» السلسلة المعطوبة وقد تتلفها. لهذا، من أجل حماية السلسلة، يتم توصيل سلسلة من الدايودات على التوالي إلى كل سلسلة من الخلايا الشمسية لتفادي التيارات العكسية (الشكل (2 ـ 14)). وإذا انخفض جهد أيّ سلسلة بعد ذلك نتيجة أيّ عطل، تكون سلسلة الدايودات في حالة صد وتقوم بقية السلاسل بإيصال قدرتها إلى الحِمل المطلوب. إحدى مساوئ هذه التهيئة هو الفقد الدائم للجهد في سلسلة الدايودات. وأيضاً، يمكن خفض الفقد في الجهد باستخدام دايود اختراق ذي جهد منخفض مثل الجرمانيوم، أو أحد أنواع حاجز

شوتكي[2] (Schottky). ويمكن أيضاً استخدام أجهزة إحساس للمجال المغنطيسي للكشف عن التيارات العكسية وتنشيط مفتاح فصل التيار.



الشكل (2-14): توصيل على التوازي لسلاسل فولتضوئية بواسطة سلسلة دايودات للحماية.

الطريقة الأخرى هي استخدام «سلسلة» عاكسات صغيرة نسبياً في الجانب الذي يحوي تكييف القدرة. والقدرة المترددة (المتزامنة) الخارجة من كل سلسلة يتم بعد ذلك توصيلها على التوازي.

2-3-2 الخصائص الميكانيكية

2 ـ 3 ـ 2 ـ 1 التصفيح الشطائري

التصفيح المكوّن من زجاج ـ بلاستيك ـ خلايا شمسية ـ بلاستيك ـ زجاج يسمى منظومة فولتضوئية «مغلَّفة»، بينما التصفيح

(2) الفقد في الجهد سيكون 0,3 V بدلاً من 0,7 V في دايودات السليكون.

المكوّن من زجاج ـ بلاستيك ـ خلايا شمسية ـ بلاستيك يسمى منظومة فولتضوئية «مصفحة». والبلاستيك أساساً عبارة عن رقاقة (سمكها 0.5 إلى 0.7 mm) من أسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين (EVA)، الذي تم معالجته عند درجة حرارة 150 ^oC في جهاز تصفيح مفرَّغ: «ينضج» البوليمر المشترك EVA عند درجة الحرارة تلك ويجعل عملية التصفيح غير قابلة للانعكاس. والتفريغ يمنع تكوّن الفقاعات الهوائية داخل التصفيح. ولمنع البلاستيك من الانحلال بواسطة أشعة الشمس فوق البنفسجية («الاصفرار» أو «التحول إلى اللون البنّي») يتم إضافة مادة ماصة للأشعة فوق البنفسجية إلى أسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين. الرقاقة الموجودة في الجانب الخلفي للمنظومة الفولتضوئية «المصفحة»، بدلاً من الزجاج، هي عادة تركيب من رقائق التيدلر ـ البوليستر ـ التيدلر أو التيدلر ـ الألمنيوم ـ التيدلر بسماكة 0.5 mm. والتيدلر (Tedlar) هو الاسم التجاري لغشاء الفلوريد متعدد الفينيل (PVF). والألواح الزجاجية لكِلا النوعين مصنوعة من زجاج معالج حرارياً وخالٍ من الحديد بسماكة 2 mm إلى 4 mm لتحقيق نفاذية عالية للضوء واستيفاء متطلبات قوانين ISO 203[3]، المزيد من خصائص هذه المواد مقدمة في الملحق في الجداول (أ ـ 10) إلى (أ ـ 14).

2 ـ 3 ـ 2 ـ 2 تشكيل الإطار

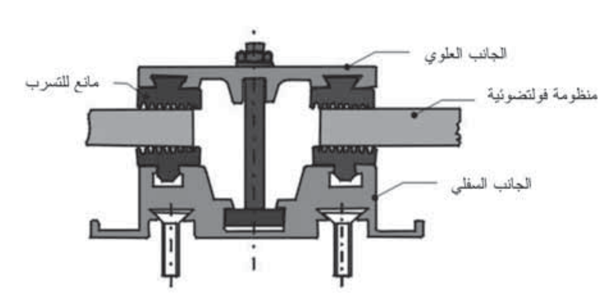
أُطُر المنظومات الفولتضوئية تصنع أساساً من صفائح ألمنيوم، التي تحتفظ بالتصفيح فوق الإطار. ويتم تثبيت أركان الإطار بإحكام بواسطة مسامير لولبية فولاذية مقاومة للصدأ أو بالحشو على شكل

(3) لمقاومة مطر البرَد حتى سماكة 25 mm، واستقرار التواء المنظومة الفولتضوئية لسرعة رياح حتى 200 Km/h

أسنان المنشار. ويتم عصر خراطيم صغيرة من السليكون المطاطي بين التصفيح والتشكيل الإطاري للألمنيوم لتحفظ التصفيح مثبتاً، وهي قادرة أيضاً على تحمُّل التمدد نتيجة درجة الحرارة والإجهاد الميكانيكي. الخيار الآخر «الأنظف» هو استخدام شريط لاصق ذاتي الالتصاق (مثل البيوتيل (Butyl)) يتم استعماله على حافة التصفيح قبل عملية تثبيت مسامير الإطار. للتقليل من التكاليف، وأيضاً للحصول على عامل أفضل للتنظيف الذاتي واستهلاك أقل لطاقة الإنتاج، تُستخدم منظومات لاإطارية بأعداد متزايدة. وتركيب مثل هذه المنظومات على بنية الدعامة يتم بواسطة مركّبات تثبيت كالمبيّنة في الشكل (2 ـ 15).

2 ـ 3 ـ 2 ـ 3 التثبيت والتركيب

يتم تجهيز المنظومات مع الأطر بحيث تكون مثقوبة بثقوب أو بأسنان لولبية للتثبيت. ونتيجة المقاومة المطلوبة للتآكل، يجب أن تكون جميع المسامير والأسنان اللولبية من الفولاذ المقاوم للصدأ بجودة V2A إلى V4A (للتطبيقات البحرية). وللمنظومات الفولتضوئية اللاإطارية، يتم التثبيت بواسطة مركّبات تثبيت (الشكلان (2 ـ 15) و(2 ـ 16).



الشكل (2-15): مقطع عرضي لمركّب التثبيت للمنظومات الفولتضوئية اللاإطارية (شميد (Schmid) 1988).



الشكل (2-16): مولّد فولتضوئي سقفي بمنظومات لاإطارية ومركّبات تثبيت.

بالإضافة إلى الحاجة إلى مواد أقل، فإن طريقة التعامل مع المنظومة هي أيضاً ذات فائدة بعد تثبيت وربط المسامير اللولبية في الجزء الأمامي من اللوح. التأثير الجانبي الإيجابي هو أن تراكماً أقل للغبار والأتربة يحدث عند حافة المنظومة. طبقات الغبار هذه ستُغسل وتُزال عند سقوط الأمطار، بينما في المنظومات الإطارية يحدث تراكم للأتربة التي تنمو من الحواف (عند حدود الإطار) نحو مركز السطح الأمامي للمنظومة. إضافة إلى ذلك، يقدّر المهندسون المعماريون المظهر المرئي الأكثر تجانساً الذي تظهره المنظومات الفولتضوئية اللاإطارية.

التطوير الجديد نسبياً لتركيب منظومات الفولتضوئية جذابة شكلاً وتجارياً هو تقنية الإلصاق. التجارب الأولى، على سبيل المثال بمنظومة PHALK-Mont Soleil 560 kW_p في سويسرا، تبدو واعدة جداً - كان التنصيب أسرع، كما تم التخلص من

مشاكل التآكل في مكونات التركيب المحتوية على إطار الألمنيوم، والمسامير اللولبية الفولاذية المقاومة للصدأ، وبنية الدعامة الفولاذية. ومن ناحية أخرى، فإن تفكيك المنظومة من غير تدميرها ليس ممكناً، لكن بالأخذ بعين الاعتبار العمر الزمني الطويل وفاعلية المنظومات الفولتضوئية، فإن هذا العامل يعتبر أقل أهمية. وفي المستقبل، سيجعل رفع أجور الأيدي العاملة وخفض سعر المنظومة من هذا التصميم أيضاً أكثر قبولاً. على أيّ حال، بالرغم من أن معامل التمدد الحراري للمواد البلاستيكية المحتواة في المنظومة أكبر من تلك للزجاج، إلاّ أن المنظومة تميل إلى أن تكون متوترة كثيراً بانثنائها في أثناء عملية المعالجة، وبالتالي فإن حجم المنظومة يكون محدوداً.

2 ـ 4 خصائص المولّدات الفولتضوئية في ظروف التشغيل

القدرة الكهربائية الخارجة للخلايا الشمسية السليكونية تقل كلما زادت درجة الحرارة وذلك بسبب الفقد في الجهد للخلايا الشمسية السليكونية أحادية البلورة ومتعددة البلورة المستخدمة بشكل متكرر، فإن الفقد في الجهد والقدرة هو ما بين 12 في المئة إلى 15 في المئة مقابل زيادة في درجة الحرارة بمقدار 30 K (انظر الجدول (2 ـ 1)). بالتركيب التقليدي أو بدمج السقف بالمولدات الفولتضوئية، فإن درجات حرارة 300 K للخلية وأعلى بكثير من درجة حرارة الوسط المحيط يمكن بلوغها خلال يوم مشمس. وبشكل خاص في أثناء الظهيرة، عندما تصل قيمة الإشعاعية إلى ذروتها، فإن كفاءة التحويل للخلايا الشمسية تصبح أقل ما يمكن بسبب تأثير درجة الحرارة.

الجدول (2 ـ 1): معاملات درجة الحرارة (TC) المقاسة للمنظومات الفولتضوئية السليكونية.

نوع المنظومة الفولتضوئية	TC (V_{oc}) (% /K)	TC (I_{sc}) (% /K)	TC (*FF*) (% /K)	TC (P_{mp}) (% /K)
أحادية البلورة رقم 1	ـ 0.2817	0.0411	ـ 0.1265	ـ 0.3619
أحادية البلورة رقم 2	ـ 0.3413	0.0130	ـ 0.1642	ـ 0.5035
متعددة البلورة رقم 1	ـ 0.2632	0.0435	ـ 0.1172	ـ 0.3318
متعددة البلورة رقم 2	ـ 0.3675	0.0675	ـ 0.1732	ـ 0.4690
متعددة البلورة رقم 3	ـ 0.2925	0.0407	ـ 0.1556	ـ 0.3996
ASE-300-DG/50 (متعددة البلورة)	ـ 0.3726	0.1097	TC(V_{mp}) = 0.4752 TC (I_{mp}) = +0.0372	ـ 0.4397
أمورفية دنيا ($a\text{-}Si_{min}$)				ـ 0.0393
أمورفية قصوى ($a\text{-}Si_{max}$)				ـ 0.2045

المراجع: إيميري وآخرون (Emery [et al.], 1996)؛ وللنوع ASE-300-DG/50: كنغ وآخرون (King [et al.], 1996).

حتى الآن، الظروف المرجعية المستخدمة لتصنيف المنظومات الفولتضوئية (ظروف الفحص المعيارية[4]، وظروف التشغيل المعيارية[5]) تعطي عوامل أداء لنقطة تشغيل محددة واحدة فقط (طيف محدد، وسقوط رأسي، ودرجة حرارة ثابتة للخلية، وسرعة

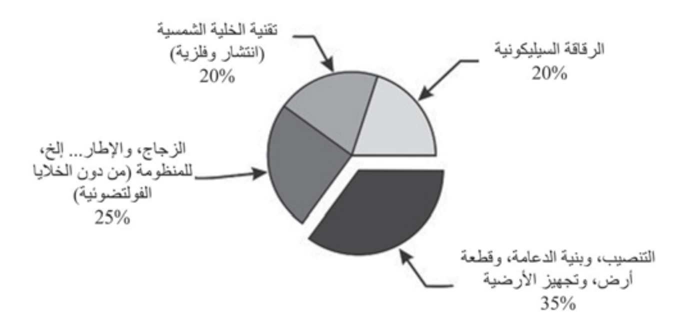
(4) **ظروف الفحص المعيارية**: درجة حرارة الخلية 25 ºC، وإشعاعية 1000 W/m^2 (رأسية)، وطيف شمسي مكافىء لكتلة هوائية 1,5 (انظر أيضاً الأنواع المعيارية الآتية في الجدول (أ – 19أ) في الملحق: IEC 1- 60904، IEC 62145، IEC 61215).

(5) **ظروف التشغيل المعيارية**: مثل ظروف الفحص المعيارية إلاّ أنها تستخدم درجة الحرارة الفعلية المقاسة للخلية، وتتم عند إشعاعية 800W/m^2 ودرجة حرارة 20ºC للوسط المحيط وسرعة رياح 1m/s. والقيم الشائعة هي ما بين حوالى 42ºC إلى 57ºC. وظروف التشغيل المعيارية تحقق قيماً واقعية للتشغيل أكثر من ظروف الفحص المعيارية (انظر أيضاً الأنواع المعيارية الآتية في الجدول (أ–19أ) في الملحق: IEC 60891، IEC 61853 (تمهيدي IEC 61721).

رياح ثابتة). بالنسبة إلى المستخدِم، معرفة المردود في فترة زمنية معيّنة (شاملاً جميع ظروف التشغيل الحادثة) تعتبر مهمة جداً. لهذا، فإن الفحص والتوقع اليومي بدرجة الحرارة الفعلية، وتقرير الكفاءة، والتوليد الفعلي للكهرباء هي أمور مهمة، وخصوصاً للتقويم الاقتصادي لمحطة القدرة الكهربائية العاملة بالفولتضوئية. ويمكن ملاحظة فروق كبيرة في التقديرات استناداً إلى ظروف التشغيل المعيارية، وبصفة خاصة لظروف الفحص المعيارية. هذه الفروق ليست ناشئة بسبب درجات الحرارة المرتفعة فقط، بل بسبب الفقد الضوئي بالانعكاس أيضاً.

2 ـ 5 تركيب المنظومات الفولتضوئية

بالرغم من أن الأبحاث والتطوير المتواصلة نحو طرق الإنتاج الأكثر تقدماً أدت إلى خفض تكاليف الخلايا الشمسية والمنظومات الفولتضوئية (انظر الشكل (2 ـ 17))، إلاّ أن نفقات التنصيب والتركيب ظلت ثابتة أو ربما ازدادت نتيجة ارتفاع تكاليف الأيدي العاملة. وإسهام نفقات التنصيب فقط تبلغ 21 في المئة ـ 53 في المئة (40 في المئة في المتوسط، انظر (1994) Wilk، و(1994) Strippel.



الشكل (2-17): توزيع التكاليف على تنصيب محطة قدرة فولتضوئية صغيرة (من دون تكييف القدرة الكهربائية) ((Goetzberger) 1994).

يتكون التركيب التقليدي في الحقل المفتوح من قاعدة إسمنتية، وأنابيب أو صفائح معدنية يتم في الأغلب تعديلها بحسب الطلب لتتطابق مع مقاس المنظومة. مثل هذا التشييد الخاص يتضمن تكاليف عالية للمواد والأيدي العاملة، بالإضافة إلى تكاليف صيانة عالية بسبب قابلية التآكل. وفي أغلب الأحيان، المواد التي تتطلب طاقة كبيرة للإنتاج، مثل الألمنيوم، تؤدي إلى أزمان استرداد مرتفعة للطاقة (Energy Pay-back Times) لنظام التوليد الفولتضوئي.

بالإضافة إلى طرق التثبيت المحسَّنة للمنظومة مثل تقنية التثبيت باستخدام الغراء (انظر القسم 2 ـ 2 ـ 2 ـ 3)، التي تؤدي إلى خفض في تكاليف التركيب، يمكن أيضاً أن تظهر ابتكارات جديدة في بنية الدعامة والقاعدة (انظر الفصول 10 ـ 2 إلى 10 ـ 4)، ما تؤدي إلى تنصيب أسرع في البناء من دون مسامير لولبية ومن دون بناء قاعدة.

حالياً، تعتبر الفولتضوئية مربحة جداً في المناطق البعيدة مثل المناطق الألبية الشاهقة[6]. إلاّ أنه في تلك المناطق، عملية نقل المواد والمعدات مثل حاملات الفولاذ وخلاطات الخرسانة الإسمنتية يمكن أن تؤدي إلى صعوبات.

---

(6) في المناطق البعيدة، توصيلات الشبكة الكهربائية تكون باهظة التكاليف، كما تتطلب المولدات التي يتم تشغيلها بطرق تقليدية مثل مولدات الديزل تكاليف إضافية لنقل الوقود، والنفط، وقطع الغيار. في مثل هذه المناطق البعيدة فإن أنظمة توليد الطاقة المتجددة غالباً ما تكون مربحة جداً، حتى في الظروف التجارية الراهنة (Kayne, 1992 and Vallvé 1994).

الشكل (2-18): إنشاء تقليدي من خرسانة إسمنتية وألمنيوم للقاعدة، وبنية الدعامة، والتركيب (مركز أبحاث الطاقة الكهربائية (CEPEL)، ريو دي جانييرو).



الشكل (2-19): إنشاء تقليدي وباهظ الثمن للتركيب في جبال الألب (ويلك Wilk (1994)).

2 ـ 6 التطوير المستقبلي للفولتضوئية

في العقود السابقة، تم إحراز تقدم كبير في كلٍّ من كفاءات التحويل الفولتضوئي داخل المختبر (Green, 1995) وفي تخفيض تكاليف الإنتاج (انظر الشكل (2 ـ 22)). ومع ذلك، فإن توليد الطاقة الفولتضوئية تنافسي في التطبيقات غير المرتبطة بالشبكة فقط إذا لم تؤخذ في الاعتبار التكاليف الاجتماعية للوقود الإحفوري.

وإمكانية تطوير مكونات نظام واحد ليست بعيدة جداً عن الدرجة المثلى النظرية. ومع أن الخلايا الشمسية المصنوعة من مواد أخرى غير السليكون يمكن أن تحقق كفاءات أعلى، إلاّ أن توافر هذه المواد منخفض، وهي أغلى ثمناً، وغالباً جداً ما تكون أقل سلامة من الناحية البيئية عن السليكون. وهناك حاجة للمزيد من

التطوير في مجال الإنتاج المربح، ومكونات الأنظمة الفولتضوئية، والتنصيب (تقنية الأغشية الرقيقة، وتكييف القدرة الكهربائية المدمج، والتطبيقات). ومن أجل الحفاظ على تكاليف إنتاج مخفضة، فإن البيانات المطبقة على العينات المعملية لا يمكن نقلها إلى الإنتاج الواسع. ونتيجة ذلك، فإن الخلايا الشمسية المتوافرة في السوق تصل إلى أقصى كفاءات تحويل قدرها 20 في المئة إلى 21 في المئة (مثلاً، لشركة Sunpower)، بينما العينات المعملية تصل إلى 25 في المئة (مثلاً، لجامعة نيو ساوث ويلز (UNSW)، ومعهد فراونهوفر لأنظمة الطاقة الشمسية (ISE)). ونتيجة ضرورة التوصيل على التوالي للخلايا، تُفقَد أُومات إضافية ويكون التيار المحتمل محدداً بالرابط الأضعف، أي الخلية الأسوأ. أضف إلى ذلك، فإن مساحة المنظومة كاملة لا يمكن تغطيتها بالخلايا الشمسية بسبب المتطلبات الفراغية للعزل الكهربائي والتمدد الحراري للخلايا. هذه الضرورة تحد من مساحة المنظومة التي يمكن تغطيتها بالخلايا الشمسية وبالتالي تبلغ الكفاءة الكلِّية فقط ما بين 15 في المئة إلى 17 في المئة. وتحت ظروف التشغيل الحقيقية، يمكن ملاحظة عمليات الفقد الإضافية الآتية:

- الفقد بالانعكاس الضوئي بسبب الإشعاعية غير العمودية (Krauter, 1994a).
- الفقد بسبب انخفاض مستوى الإشعاعية (انخفاض عامل التشكُّل والجهد).
- الفقد الحراري مع انخفاض الجهد نتيجة درجات الحرارة المرتفعة للخلية (Krauter, 1993c).
- انخفاض التيار الخارج لإشعاعية الأطياف الشمسية ذات الكتلة الهوائية الأقل من 1.5 AM.
- التظليل: إذا تم تظليل خلية في سلسلة متصلة على التوالي،

فإن التيار الخارج يكون محدداً بواسطة التيار المنخفض للخلية المظللة. ويمكن لدايودات الإمرار الجزئي تفادي هذا التأثير إلى حد ما. والتيار المتسرب لدايودات الإمرار الجزئي يمكن أن يُحدِث أيضاً بعض الفقد في الأداء. وإذا تم استخدام سلاسل متوازية في المولد الشمسي، فإن السلاسل ذات الجهد المنخفض بسبب التظليل قد تعمل كحِمل. لهذا، تُستخدم دايودات على التوالي لتفادي حالة الحِمل على السلسلة. ومن ناحية أخرى، يحدث فقدٌ في الجهد بمقدار 0.3 V إلى 0.7 V (اعتماداً على نوع الدايود) في الدايودات المتصلة على التوالي.

- وحدات تكييف القدرة الكهربائية غالباً ما توضع في المباني الصغيرة على مسافة بسيطة من المولّد. وفقاً للأبحاث العلمية، فإن الفقد في أسلاك التوصيل من المولّد إلى المحوّلات (Converters) هي في حدود 3 في المئة لمعظم التطبيقات.

- غالباً ما تمتلك العاكسات كفاءة تحويل عالية لقدرة الدخل المصنَّفة، لكن لمستويات الإشعاعية المنخفضة والقدرة الداخلة المنخفضة تقل كفاءة التحويل. لهذا، فإن متوسط كفاءة التحويل على مدى يوم كامل يمكن أن يكون أقل بكثير من القدرة المصنَّفة.

بالأخذ في الاعتبار جميع عمليات الفقد هذه، فإن النسبة بين الإشعاعية إلى الطاقة الكهربائية المتولدة على مدى عام واحد هي ما بين 10:1 إلى 12:1. لحساب قيم الفقد هذه والفروق الناتجة منها مع المردودات المتوقعة، تستخدم الأبحاث العلمية عامل تصحيح غامضاً هو «معدل الأداء» (Performance Ratio) (بدقة 10 في المئة ـ 20 في المئة) لتعويض الفرق بين قدرة الخرج المتوقعة المصنَّفة والأداء

الحقيقي. وفي الوقت الحاضر، يُستخدّم هذا الأسلوب أيضاً للعاكسات الكهربائية. التحليلات التفصيلية حول أسباب الفقد في الأداء نادرة، وبالمثل أيضاً التحسينات البنّاءة لتفاديها. بعض الطرق لتعويض هذه الفروق نعرضها هنا.

تحت ظروف التشغيل الحقيقية، المردودات التي تم تحقيقها هي أقل بمقدار 23 في المئة ـ 45 في المئة من القيم التي تم تحقيقها في المختبرات أو تحت ظروف الفحص المعيارية. وقد أجريت أبحاث لذلك التأثير ضمن «البرنامج المكثف للتحليل والمراقبة» (I-MAP) كجزء من «برنامج الـ 1000 سقف فولتضوئي» الألماني بواسطة كيفر Kiefer (1994)، وفي محطة القدرة الفولتضوئية «نيوراذر سي» (Neurather See) بواسطة فويرمان Voerman (1984).

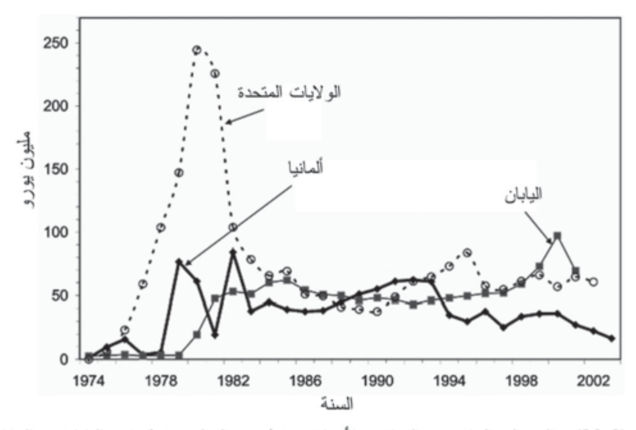
بتحسين الخصائص البصرية والحرارية لتنصيب المنظومة الفولتضوئية، يمكن تحقيق كسب للمردود الكهربائي بمقدار 12 في المئة تحت ظروف التشغيل الحقيقية، والذي يؤدي إلى الحصول على كفاءة تشغيل قريبة جداً من الكفاءة الاسمية (Krauter, 1993c, 1994b, 1996a).

بسبب الكفاءات الأعلى والتكاليف الأقل لمكونات النظام الفولتضوئي (المنظومات الشمسية والعاكسات)، تزداد أمور أهمية التنصيب والتركيب. تكاليف تركيب المنظومة، بصفة خاصة، عالية بشكل غير متكافئ، كما هو ملاحظ من الشكل (2 ـ 17). إلاّ أن هناك احتمالاً كبيراً لخفض تكاليف هذه الأجزاء والوصول في النهاية إلى نشر أسرع للأنظمة الفولتضوئية في سوق الطاقة.

بتوسيع المعرفة للعلاقة بين المنظومة الفولتضوئية والبيئة الحقيقية، فإن قيم كسب الكفاءة يمكن توقعها بأن تتجاوز تلك الممكن تحقيقها في تقنية الخلية الشمسية.

2 ـ 7 تمويل أبحاث الفولتضوئية

بدأ التمويل الحكومي على أبحاث الفولتضوئية الأرضية بعد الأزمات النفطية لعام 1973. يوضح الشكل (2 ـ 20) رسماً بيانياً للتمويل من عام 1974 إلى عام 2003 (وإلى عام 2002 في الولايات المتحدة). وواضح تماماً أنه حتى عام 1980، كان التمويل المكثف من قِبَل إدارة الرئيس الأميركي كارتر، والخفض الكبير تم بواسطة إدارة ريغان. وفي ألمانيا، يمكن ملاحظة حدوث انخفاض في التمويل المباشر خلال الأعوام 1990 إلى 1994 لصالح التمويل غير المباشر ضمن «برنامج الـ 1000 سقف فولتضوئي» (الذي دعم آنذاك في الواقع 2250 سقف فولتضوئي). وخلال تلك الفترة، ازدادت ميزانية التمويل المباشر بشكل ثابت في الولايات المتحدة.



الشكل (2-20): التمويل الحكومي المباشر لأبحاث وتطوير الفولتضوئية في اليابان، والولايات المتحدة، وألمانيا (المراجع:(Sissine ،1994) ، و(Sandter ،1993)، و(Brauch ،1997)، ووزارة الطاقة الأميركية؛ والوكالة الدولية للطاقة (IEA-PVPS)، استناداً إلى أسعار صرف الدولار الأميركي لعام 2003. أسعار الصرف بين الدولار الأميركي، والمارك الألماني، واليورو مبيّنة في الجدول (أ–17) في الملحق).

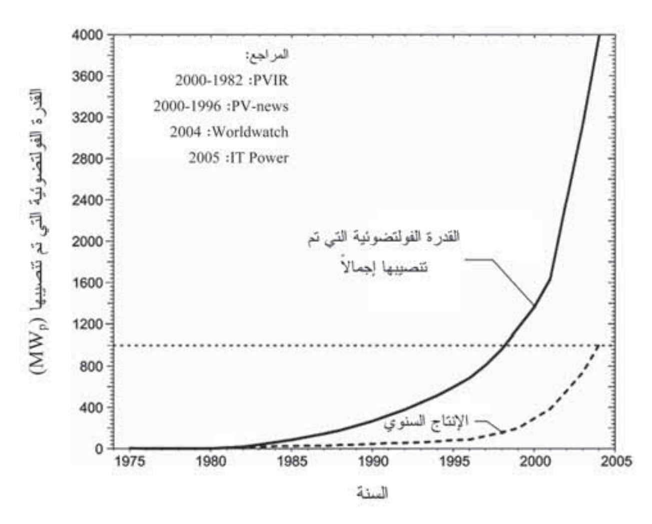
التمويل لأبحاث الفولتضوئية والطاقات المتجددة الأخرى أدنى بعامل ثمانية من النفقات المكافئة لأبحاث الطاقة النووية. و2.9 في

المئة من ميزانية أبحاث وتطوير الطاقة الألمانية فقط كانت تُنفَق على الطاقة الشمسية في الأعوام 1981 إلى 1990، بينما الدانمارك، على سبيل المثال، كانت تُنفِق 26.9 في المئة من الميزانية المكافئة على الطاقات المتجددة (Scheer, 1993).

في ألمانيا، يتم صرف مئة ضعف ميزانية أبحاث الطاقة المتجددة على دعم تعدين الفحم الحجري غير المنافس (في عام 1997: 4,57 بليون يورو؛ وفي عام 1998: 4.74 بليون يورو ـ انظر الجدول (أ ـ 6) في الملحق). الإعانة المالية لكل عامل منجم والعاملين الآخرين في صناعة التعدين تصل إلى 51.000 يورو/ سنة. وهذا المبلغ يمكن أن يكون كافياً لإيجاد ضعف عدد الأعمال في قطاع الطاقة الشمسية.

2 ـ 8 تطور سوق الفولتضوئية

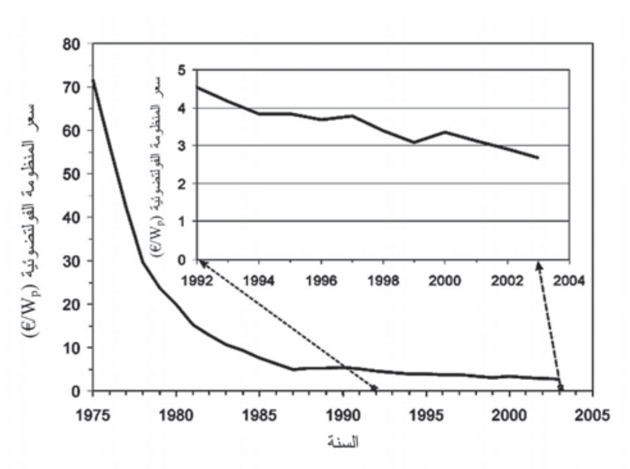
يبيّن الشكل (2 ـ 21) تطور إنتاج الفولتضوئية حول العالم. وإنتاج المنظومات الفولتضوئية من حيث القدرة المُخرجَة تحت ظروف فحص معيارية (مشار إليها بالحرف التحتي "p" المشتق من كلمة «ذروة» (Peak)) ازداد من 3.3 MW_p في عام 1980 إلى 1000 MW_p في عام 2004. وهذا يطابق متوسط النمو السنوي البالغ حوالى 14 في المئة. وإجمالي القدرة الكهربائية التي تم تنصيبها في نهاية عام 2004 كانت 4000 MW_p. يبدو هذا التطور كافياً تماماً، ولكن مقارنة بالسعة الإنتاجية لمحطة القدرة التقليدية فإن هذه القيمة لا تزال صغيرة.



الشكل (2-21): تطور سوق الفولتضوئية: السعة التي تم تنصيبها والإنتاج السنوي (المراجع: أخبار الفولتضوئية (PV-news) وتقرير المطلعين على الفولتضوئية ((Photovoltaic Insiders Report (PVIR)): 2000-1982، ومعهد المراقبة العالمية (Worldwatch Institute): 2004، وتقنية معلومات القدرة (IT Power): 2005).

في عام 1973، كانت أسعار المنظومات الفوتوفولتية حوالى 700 دولار أميركي لكل W_p؛ ونتيجة ذلك كانت تُستخدم فقط للتطبيقات الفضائية. وكانت المنظومات الفوتوفولتية الأرضية معروضة بأسعار تتراوح بين 70 ـ 80 دولاراً أميركياً لكل W_p في عام 1975. وفي الوقت الحاضر (عام 2000) المنظومات الفولتضوئية الأرضية متوفرة بسهولة بأسعار تتراوح بين 2 ـ 3 دولار أميركي لكل W_p. تطور هذه الأسعار مبيّن في الشكل (2 ـ 22). ويبيّن الجدول (2-2) مثالاً على تكاليف الإنتاج الحالية.

التكاليف النسبية لتنصيب نظام فولتضوئي كامل يتكون من منظومات فولتضوئية، وتنصيب، وبنية دعامة، وقطعة أرض، وتجهيز الأرضية (من دون تكييف القدرة الكهربائية وتخزين الطاقة) مبيّنة في الشكل (2 ـ 17).



الشكل (2-22): تطور أسعار الأنظمة للفولتضوئية (€ لكل W_p) من عام 1975 إلى 2003 مع تكبير الفترة الحالية من عام 1992 إلى 2003 (البيانات المعطاة بالدولار الأميركي قد تم إرجاعها إلى عام 1998) (المصدر: معهد المراقبة العالمية 2003، والوكالة الدولية للطاقة 2005).

إسهامات السوق العالمية بالأنظمة الفولتضوئية الأرضية في مطلع التسعينيات

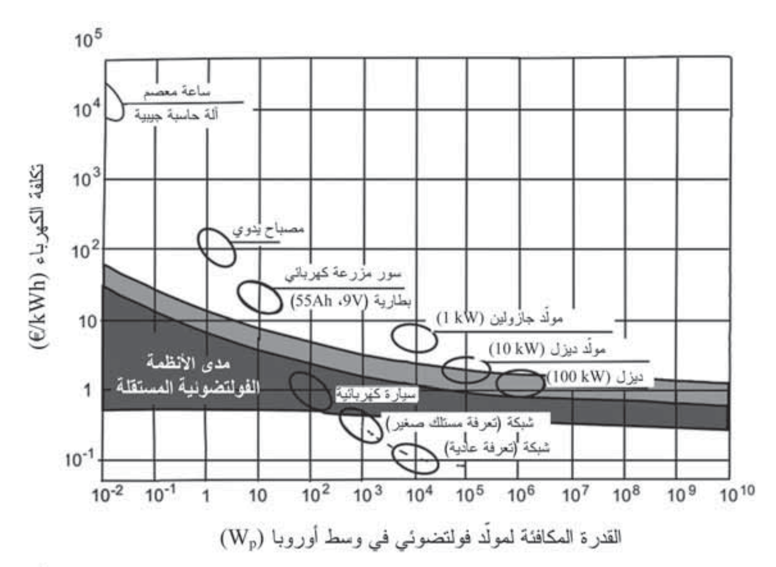
الاتصالات (أجهزة الإرسال، مثلاً)	21 في المئة
الأنظمة الشمسية المنزلية (منظومة إلى منظومتين)	16 في المئة
تطبيقات مستهلك الطاقة العالية	15 في المئة
أنظمة ضخ المياه	11 في المئة
الأنظمة المرتبطة بالشبكة	11 في المئة
القاطنون في مناطق بعيدة (أكثر من منظومتين)	7 في المئة
تطبيقات مستهلك القدرة المنخفضة (ساعات... إلخ)	6 في المئة
مصدر قدرة كهربائية لقرية	4 في المئة
منع التآكل الكاثودي (السالب القطب)	3 في المئة
العسكرية؛ إرسال الإشارات	3 في المئة
المناطق البعيدة (أخرى)	3 في المئة

خلال العقد الماضي، نما نصيب الأنظمة المرتبطة بالشبكة من 11 في المئة إلى أكثر من 70 في المئة في عام 2002. هذا التطور كان متأثراً ببرامج الدعم الحكومي في دول العالم الأول، بينما الدعم الحكومي للأنظمة الفولتضوئية غير المرتبطة بالشبكة، الواقعة أساساً في الدول النامية، كان أقل. وأعداد التنصيبات غير المرتبطة بالشبكة ازدادت بشكل ثابت، إلاّ أن إسهامها النسبي للسوق انخفض. وفي القسم غير المرتبط بالشبكة، فإن الإسهام النسبي لمختلف التطبيقات ظل كما هو عليه.

الجدول (2 ـ 2): تكاليف إنتاج المنظومات الفولتضوئية السليكونية متعددة البلورة في ألمانيا.

المرجع	(Mertens 1992) (Stacβ 1995), (DM/W_p)			LBST (1995) (DM/W_p)		Frantzi [et al.] 2000 $\$/W_p$	
العملية	أقل سعر	السعر المتوسط	أعلى سعر	5 MW/a	20 MW/a	عام 2000 10 MW/a	عام 2010 100MW/a
سليكون (مادة أساسية)	0.51	0.58	0.50				
قولبة	0.82	1.11	1.37	2.25	1.79	0.82	-
إنتاج الرقاقة	0.80	1.13	1.00				
صناعة الخلية	0.70	1.48	2.38	2.46	1.32	0.44	-
إنتاج المنظومة	1.03	1.85	2.62	1.28	0.87	0.86	-
تكاليف عامة، ربح	-	-	-	1.80	1.20	-	-
الإجمالي	3.86	6.15	7.87	7.79	5.18	2.12	1.15*

* ورد ذكر هذا الرقم في الكتاب من دون تعريف لمصدره (المترجم).



الشكل (2-23): تكاليف تطبيقات الفولتضوئية المستقلة كدالة في القدرة القصوى لمولّد فولتضوئي ومقارنتها بطرق تزويد الطاقة الكهربائية الأخرى (شميد (Schmid) 1995). الرمادي الفاتح لظروف وسط أوروبا ($1000\ kWh{\cdot}a^{-1}m^{-2}$)، والغامق لمواقع قريبة من خط الاستواء ($2000\ kWh{\cdot}a^{-1}m^{-2}$).

ويبيّن الشكل (23 ـ 2) مجالات التطبيق للأنظمة الفولتضوئية المستقلة مقارنة بتقنيات تزويد الطاقة الكهربائية التقليدية.

توزيع إنتاج الخلية الشمسية بحسب التقنية

(المرجع: (P. D. Maycock)، أخبار سوق الفولتضوئية PV market update، 2003)

- سليكون متعدد البلورات — 58 في المئة
- سليكون أحادي البلورة — 32 في المئة
- تقنية الأغشية الرقيقة — 7 في المئة
- أخرى — 3 في المئة

السياسات الحكومية لتقديم الفولتضوئية إلى السوق ـ ألمانيا كمثال

لتسريع اختراق السوق بالطاقات المتجددة، تدفع الحكومة الألمانية رسوماً مستدامة عن كل كيلووات/ ساعة من الكهرباء الفولتضوئية المحقونة في الشبكة العمومية منذ نيسان/ أبريل . وقد كان الدفع مقابل توليد الطاقة الكهربائية المتجددة ناجحاً جداً في مجال محوّلات الرياح، ما أدى إلى زيادات في القدرة التي تم تنصيبها بمقدار 30 في المئة لكل سنة على مدى العقد الماضي (إجمالي السعة لتوليد قدرة الرياح التي تم تنصيبها في ألمانيا بلغت 16629 MW في عام 2004، وهي بالتأكيد السعة الأكبر في العالم).

لأن التنصيبات الفولتضوئية السابقة بأكملها كانت مموّلة، فقد تقدمت هذه التقنية (بالنسبة إلى عاكسات الشبكة في أثناء «برنامج الكهرباء الشمسية لـ 1000 سقف فولتضوئي»)، إلاّ أن أسعار مكوّنات النظام الفولتضوئي ظلت ثابتة، أو أنها ارتفعت بشكل طفيف بسبب الطلب الثابت (بالنسبة للمنظومات الفولتضوئية). ومن خلال الدفع مقابل الطاقة المتولدة فقط، أصبح مالك المحطة في هذه الحالة مجبراً على تهيئة تجهيزاته والحفاظ عليها فعَّالة قدر الإمكان. ومراقبة مردود محطة القدرة على مدى كامل العمر الزمني لها البالغ 25 ـ 30 سنة تتم الآن بواسطة مالك المحطة بنفسه. كما إن المنافسة بين مختلف مصانع الفولتضوئية أدت إلى تحسينات في التكلفة والتقنية. بدءاً من كانون الثاني/ يناير 1999 وحتى نهاية عام 2003، تم تنفيذ «برنامج الكهرباء الشمسية لـ 100000 سقف» بسعة إنتاجية مفترضة 345.5 MW وتم بناء 65700 نظام.

قبل تلك البرامج المذكورة أعلاه، قامت بعض المدن والحكومات الاتحادية، تحت ضغط من الكثير من مبادرات الطاقة

الشمسية، بدفع نحو 1.1 يورو لكل kWh من الكهرباء الفولتضوئية المحقونة بالشبكة. «قانون الإمداد الكهربائي» العام الصادر في عام 1991 تم استبداله بـ «قانون مصادر الطاقة المتجددة» في نيسان/ أبريل 2000 من قِبَل الحكومة الاتحادية. وفي عام 2004 صدرت تعرِفات إمداد محسَّنة تتراوح ما بين 0.454 إلى 0.574 يورو لكل kWh، معتمدة على حجم ونوع التنصيب (تنصيب أرضي، وتنصيب سقفي فوق $30\ kW_p$، وأنظمة سقفية تحت $30\ kW_p$) ومن دون حدود للعدد الإجمالي للتنصيب. هذا القانون عمل على تسريع عملية التنصيب والإنتاج في ألمانيا إلى $300\ MW_p$ في السنة. وخلال مدة قصيرة، أصبحت ألمانيا الرائدة في العالم من حيث السعة الفولتضوئية التي تم تنصيبها في السنة، ومن المحتمل جداً أن تتفوق على اليابان، الرائدة الفعلية لإنتاج الفولتضوئية خلال عام 2006. ولكي تشجع التقدم أيضاً في إجراءات تخفيض التكلفة، تم خفض التعويض للفولتضوئية تدريجياً بمقدار 5 في المئة في السنة.

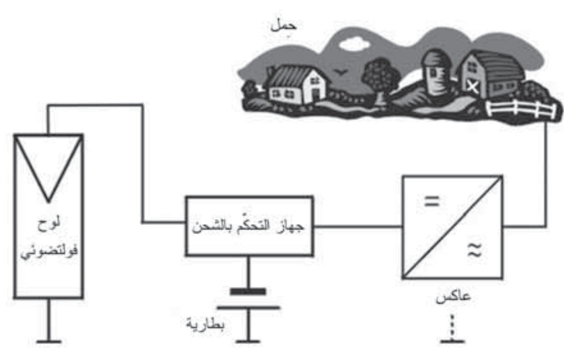


الفصل الثالث

العاكسات الكهربائية

3 ـ 1 التشغيل المستقل

بالرغم من أن توليد القدرة الكهربائية يتغير بسبب المستويات الإشعاعية المختلفة، إلاّ أن الطاقة مع ذلك يجب أن تخزن، وبخاصة عندما يكون وقت الطلب مختلفاً عن وقت التوليد ـ وهو الحال السائد جداً في أغلب الأحيان. لهذا، يجب إضافة جهاز تخزين إلى النظام يتكون من بطارية وجهاز تحكّم ملائم للشحن/ التفريغ (انظر الشكل (3 ـ 1)). وفي أغلب الأحيان، يتم الاحتياج إلى جهد متردد، لهذا يجب استعمال عاكس كهربائي (Inverter) لكي يقوم بتحويل التيار المباشر (DC) الناتج من اللوح الفولتضوئي وجهاز التخزين إلى التيار المتردد (AC) المطلوب.



الشكل (3-1): مخطط لنظام فولتضوئي مستقل مع جهاز تخزين وعاكس لأحمال التيار المتردد.

الطريقة البسيطة جداً لتحقيق ذلك هي عكس قطبية التيار المباشر تكراراً وبالتردد المطلوب للتيار المتردد (50 Hz أو Hz60) عن طريق استخدام أجهزة تسمى عاكسات مستطيلة. إلاّ أن هذا النوع من التحويل للتيار المتردد يؤدي إلى مستويات تشوُّه عالية مع الترددات الاصطناعية الأعلى، والتي يمكن أن تضر الأحمال الحساسة وتتداخل مع إشارات الراديو.

الطريقة التقريبية الأفضل للشكل الجيبي المطلوب هي استخدام عاكسات بفترة حوالى صفر للجهد (تسمى عاكسات شبه منحرفة). مستويات التشوُّه لهذا النوع من العاكسات أقل من العاكسات المستطيلة، ومع ذلك فهي لا تزال عالية.

في السابق، كانت تُستخدم ما تسمى «العاكسات الدوارة» (Rotating Inverters). في تلك العاكسات، يتم التوصيل المزدوج لموتور يعمل بالتيار المباشر بمولد يعمل بالتيار المتردد. هذه الطريقة تتيح الحصول على تردد جيبي ناعم جداً، إلاّ أن الكفاءة رديئة نسبياً، كما إن التردد يتغير عندما يحدث تغيير في الحِمل.

التقنية الأحدث في العاكسات هي «تضمين اتساع النبضة» (Pulse Width Modulation) (PWM). هنا، يتم وصل وقطع التيار المباشر لفترة زمنية قصيرة (تكوين نبضة) بحيث يكون تكامل النبضة مساوياً للمستوى الحقيقي للشكل الجيبي المطلوب. ويتم تهيئة اتساع النبضة التالية أيضاً بالطريقة نفسها بحيث يكون التكامل مساوياً للمستوى الحقيقي التالي للشكل الجيبي المعطى بواسطة جهاز التحكّم. بعد الترشيح، يكون الخارج من هذا العاكس قريب جداً من شكل جيبي تام وبكفاءة عالية نسبياً (تبلغ 96 في المئة).

3 ـ 2 عاكسات لحقن الشبكة الكهربائية

في الأنظمة الفولتضوئية المستقلة، يتغير مردود الطاقة بسبب

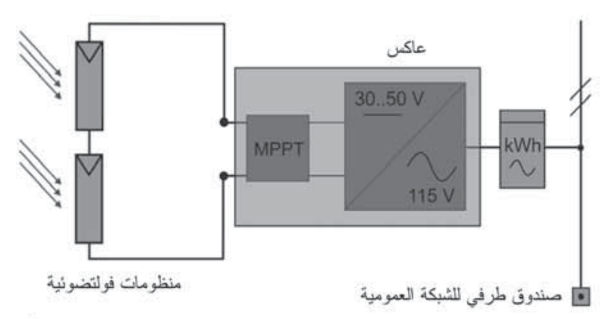
التغيرات اليومية والفصلية للإشعاعية الشمسية. في أوروبا الوسطى، متوسط الإشعاعية التي يتم استقبالها خلال الصيف أعلى بحوالى خمسة إلى ستة أضعاف من تلك للشتاء. ولهذا، يجب تجهيز تلك الأنظمة الفولتضوئية بأجهزة تخزين كافية للطاقة وذلك لتزويد الأحمال خلال الفترات التي تكون فيها الأشعة رديئة أو غير متوافرة. يرفع التخزين من سعر النظام ويجعله غالياً (خصوصاً التخزين الموسمي)، كما يزيد من تكاليف الطاقة المتولدة. لهذا، تُستخدَم الشبكة العمومية «كمخزن» أو كحاجز يتم فيها خزن الطاقة خلال فترات الإنتاج الزائد، وبالمثل، يتم أخذها خلال فترات الافتقار إلى توليد القدرة الفولتضوئية[1]. ولتسهيل عملية الحقن إلى الشبكة، يجب تحويل التيار المباشر الناتج من المولد الفولتضوئي إلى تيار متردد وفقاً لمتطلبات الشبكة العمومية.

على النقيض من عاكسات الأنظمة المستقلة، فإن الجيب المرجعي لتضمين اتساع النبضة لا يعطى بواسطة أداة التحكم بل عن طريق الشبكة. وبالرغم من أن المعاوقة الكهربائية للشبكة بشكل عام صغيرة جداً، إلاّ أن العاكسات مع ذلك يجب مزامنتها قبل التشغيل وتكييفها مع الجهد والتردد المحددين للشبكة المعنية. لهذا، العاكسات المستخدَمة للربط الشبكي تختلف عن تلك المستخدَمة للأنظمة المستقلة. وفي حالة إجراء أيّ ربط بالشبكة، يتم تهيئة المَرافق العمومية بالقيم المعيارية للحفاظ على مستويات التشوّه، ومزامنة الجهد والتيار ضمن حدود معينة. في الماضي، تم الإبلاغ عن حالات أعطال متعددة اشتملت على عاكسات الربط الشبكي، إلاّ أن التقنية في الوقت الحاضر وُجدت بأنها مستقرة جداً. وهناك بعض

(1) طبقاً للاختبارات المختلفة، فإن الشبكة العمومية في العديد من الدول (مثل ألمانيا) قادرة على السماح بحقن الفولتضوئية إلى الشبكة في حدود 15 في المئة على الأقل من قدرتها الاسمية للشبكة.

الأنواع فقط من العاكسات القادرة على العمل في كِلا نمطي التشغيل: الربط الشبكي والمستقل.

بالرغم من أن الأحمال الصغيرة يمكن استخدامها في الغالب للتيار المباشر، إلاّ أن الأجهزة الكهربائية العامة تتطلب تياراً متردداً بجهد 115 V أو 230V وبتردد 50 Hz أو 60 Hz. ولمتطلبات القدرة الكهربائية الأعلى من 3 kW إلى 10 kW، يُفضّل عادة استخدام نظام تيار متردد ثلاثي الطور (Tree-Phase).



الشكل (3-2): مخطط لنظام حقن شبكي فولتضوئي نموذجي أحادي الطور مجهّز بمتعقّب لنقطة القدرة القصوى ((Maximum-Power-Point Tracker (MPPT) وعدّاد للطاقة (kWh).

تتوافر العديد من الأنواع المختلفة من حاقنات الشبكة الفولتضوئية. وهذه الأنواع تختلف بحسب طريقة عكسها للتيار وما إذا كانت تتميز بالانفصال الجلفاني عن الشبكة (بواسطة محولات كهربائية مثلاً)، وبحسب نوع الطاقة الإلكترونية التي تستخدمها (الثايرستور (Thyristor)، أو الترانزستور نوع GTO، أو الترانزستور ثنائي القطب، أو ترانزستور القدرة MOS-FET، أو الترانزستور IGBT). ونتيجة برامج التمويل الملائمة لمحطات قدرة فولتضوئية بهذه الأحجام (مثل برنامج الـ 1.000 و100.000 سقف فولتضوئي الألماني)، فإن معظم حاقنات الشبكة هذه متوافرة بطاقات تتراوح ما بين 0.6 kW إلى 5 kW.

الفكرة المستعملة بشكل واسع هي تضمين اتساع النبضة. ولكي يحقق تضمين اتساع النبضة تردد جيبي 60 Hz أو 50 لشبكة التيار المتردد، الخطوة الأولى هي الحصول على تيار مستطيلي عن طريق عكس القطبية (كل 10 ميلي ثانية (ms) للتردد 50 Hz ، أو كل ms 8.33 للتردد 60 Hz) للتيار المباشر الخارج من محطة القدرة الفولتضوئية. يتم بعد ذلك وصل وقطع التيار المستطيلي (تكوين نبضة) بحيث يكون التكامل الناتج للنبضات مقارباً قدر الإمكان لمكافئ القيمة الجيبية المطلوب تحقيقها (انظر الشكل (3-3)). يتم تكوين النبضة بتردد عالٍ نسبياً (10–100 kHz)، ويُجرى الدمج الناتج «بتنعيم» النبضات بواسطة مرشح إمرار الترددات المنخفضة.

يجب تعديل التردد والطور بحسب الظروف الحقيقية للشبكة. فإذا تعطلت الشبكة «الموجِّهة» يجب على العاكس أيضاً أن يفصل التيار على الفور. وبشكل عام، يجب أن يحقق عاكس الشبكة المتطلبات الآتية:

- التيار الخارج يتبع جهد الشبكة بشكل متزامن («مصدر التيار»).
- التشوّه وأيضاً التوافقيات الطيفية الناتجة لتردد الشبكة لا يُسمح لها بأن تتجاور القيم الابتدائية المعطاة بواسطة المعايير (VDE 0838، EN 60555 مثلاً)، والتي تتطلب تهيئة جيدة للتيار الخارج بحسب الشكل الجيبي.
- ينبغي ألاّ يكون هناك فرق في الطور بين التيار المحقون وجهد الشبكة لتفادي ارتداد القدرة المتفاعلة بين الشبكة والعاكس، والتي قد تؤدي إلى عمليات فقد إضافية وشحن زائد في نهاية المطاف.
- في حالة العطل (جهد شبكي مفقود، أو تردد عالٍ ناتج عن عكس القطبية، أو قصر دوائر، أو أعطال في العوازل) يجب أن ينفصل حاقن الشبكة عن الشبكة بشكل آلي.

- إشارات التحكم في الشبكة، غالباً ما تُستخدم بواسطة مزوّدي الطاقة، يجب ألاّ تضطرب بواسطة حاقن الشبكة، كما يجب على الإشارات ألاّ تؤثر في عمل حاقن الشبكة.
- يجب تهيئة المقاومة الطرفية المُدخَلة جيداً بحسب الخصائص الفعلية للمولد الشمسي في أثناء التشغيل، بواسطة متعقِّب لنقطة القدرة القصوى (MPPT) مثلاً.
- تقلبات الجهد المُدخل (مثلاً، عند 100 Hz الناتجة عن جهاز حاقن الطور الأحادي) يجب أن تكون منخفضة (أقل من 3 في المئة) وذلك للسماح لتشغيل المولد الشمسي قريباً من نقطة القدرة القصوى له.
- الجهد الزائد، مثلاً الناتج بواسطة المولد الشمسي عند درجات الحرارة المنخفضة القريبة من ظروف الدائرة المفتوحة، ينبغي ألا يؤدي إلى أعطال.
- لظروف الحِمل الزائد يتم تحديد القدرة المُدخَلة إلى قيمة معيّنة من خلال زحزحة نقطة تشغيل المولّد الفولتضوئي نحو جهد الدائرة المفتوحة. وهذا يمكن أن يحدث عندما تكون القدرة الاسمية للعاكس أقل من القدرة الاسمية للمولد الفولتضوئي. ومثل هذا الحدوث يؤدي بشكل غير متكرر (انظر الشكل (7-27))، في أثناء الإشعاعية العالية جداً، إلى حِمل مُدخَل زائد لحاقن الشبكة.
- يجب تزويد عاكس الشبكة بواسطة المولد الشمسي لتفادي الاستهلاك من الشبكة (في المساء مثلاً). ويجب أن يتغير العاكس إلى نمط التشغيل بسهولة عند مستويات الإشعاعية المنخفضة، كما يجب أن يعمل بشكل مستقر. يتم حقن الأنظمة الفولتضوئية الحديثة بسهولة إلى الشبكة عند مستويات إشعاعية $50\ W/m^2$، كما يمكن تحقيق كفاءات قدرها 90 في المئة عند 10 في المئة من القدرة الاسمية للعاكس حتى الآن.
- نقاط الدخل والخرج الطرفية يجب حمايتها من الجهود الزائدة العابرة

(مثلاً، التغيّر المفاجئ في الجهد الكهربائي الناتج عن ضربات البرق). ويتم إجراء ذلك عادة باستعمال أجهزة ماصة للجهد الزائد أو التغيّر المفاجئ في الجهد.

- يجب الالتزام بقوانين «المطابقة للمعايير الكهرومغنطيسية»، مثلاً المعيار EN 55014.
- يجب أن تكون الضوضاء المنبعثة من الأجهزة منخفضة، بحيث يُسمح بتشغيل الأجهزة أيضاً في المباني السكنية.

جودة القدرة الكهربائية الداخلة إلى شبكة المَرفق العمومي من النظام الفولتضوئي تعتبر محل قلق للمَرافق العمومية أيضاً. فإذا كانت هناك العديد من التوافقيات في مخرج العاكس فإنها قد تؤدي إلى تداخل في الأحمال في مواقع أخرى (التي قد تحتاج إلى قدرة جيبية) أو في معدات المَرفق العمومي (لنقل البيانات على خط النقل مثلاً). الآلات الكهربائية (مثل المحركات) العاملة بتشوّهات توافقية كبيرة في مزوّد القدرة تسخن وبالتالي تقل الأعمار الزمنية للمحامل (Bearings) بسبب الاهتزازات. القوانين المنظِمة للتشغيل موجودة، في المعيارين IEEE 929 و IEEE 519، وهي تضع حدوداً للتوافقيات كما هو مبيّن في الجدول (3 ـ 1)(أ).

الجدول (3-1)(أ): حدود التشوهات التوافقية للأنظمة الفولتضوئية المتصلة بالشبكة.

التوافقيات الفردية	حد التشوّه
الثالث إلى التاسع	4.0 في المئة
الحادي عشر إلى الخامس عشر	2.0 في المئة
السابع عشر إلى الحادي والعشرين	1.5 في المئة
الثالث والعشرين إلى الثالث والثلاثين	0.6 في المئة
الأعلى من الثالث والثلاثين	0.3 في المئة

التوافقيات الزوجية يجب أن تكون أقل من 25 في المئة من التوافقيات الفردية الواردة في الجدول. المراجع: IEEE 929 و1992 ـ IEEE 519، وميسينجر وآخرون (Messenger [et al.]) (2000).

ويختص المعيار IEEE 519 بالأنظمة الفولتضوئية المتصلة بالشبكة، كما يعطي معايير تتعلق بالآتي أيضاً:

اضطرابات الجهد: ينبغي ألاّ يكون الجهد عند مخرج العاكس أكثر من 5 في المئة، وهو أعلى من الجهد عند نقطة الاتصال بالمَرفق العمومي، وبالتالي فإن العاكس يجب أن يتحسس أيّ اضطرابات لجهد الشبكة ويقوم بالفصل عند الإشارة إليها. عملية الفصل يجب أن تتم خلال 10 دورات سواءً إذا انخفض جهد المَرفق العمومي إلى أقل من 50 في المئة من قيمته الاسمية أم ارتفع إلى أعلى من 110 في المئة من قيمته الاسمية. وإذا كان جهد خط المرفق بين 50 في المئة و92 في المئة من قيمته الاسمية، يجب أن يقوم العاكس بقطع التيار خلال ثانيتين.

اضطرابات التردد: في الأنظمة ذات التردد 60 Hz، إذا انخفض تردد الخط إلى أقل من 59.5 Hz، أو ارتفع إلى أعلى من 60.5 Hz، يجب فصل العاكس.

عوامل القدرة: عامل القدرة (الناتج عن فرق الطور بين التيار والجهد) ينبغي ألاّ يقل عن 0.85.

حقن التيار المباشر في شبكة التيار المتردد: ينبغي ألاّ يكون التيار المباشر أكبر من 0.5 في المئة من التيار الخارج المقدَّر للعاكس.

إضافة إلى ذلك، فإن قوانين الحماية من العزل، وإعادة التوصيل بعد تعطل الشبكة وعودتها، والحماية بالتوصيل الأرضي ضد التغير المفاجئ للتيار، وقطع التيار المباشر والمتردد يُفترض بأن تكون ضمن ذلك المعيار. وفي بعض الأحيان، يجب الأخذ بعين

الاعتبار المتطلبات الإضافية لمَرافق الطاقة المحلية. يقدم الملحق مزيداً من القوانين الدولية والأوروبية.

أحد الإعدادات النموذجية لنظام الحقن الشبكي الفولتضوئي أحادي الطور (مجهّز بمتعقِّب لنقطة القدرة القصوى وعدّاد للطاقة) موضح في الشكل (3 ـ 2).

3-3 أنواع العاكسات الكهربائية

3-3-1 عاكسات ذات تبديل خارجي

تحتاج العاكسات ذات التبديل الخارجي (External-Commutated Inverters) إلى مصدر جهد متردد خارجي (ليس جزءاً من العاكس) لتزويد «جهد التبديل» في أثناء فترة التبديل (ثايرستور مثلاً، وانظر أيضاً المعيار DIN 41750 الجزء الثاني). في العاكسات المتحكَّمة بواسطة الشبكة، يتم تزويد هذا الجهد المتردد بواسطة الشبكة. ويتم تشغيل العاكسات ذات التبديل الخارجي بواسطة «التبديل الطبيعي». وإحدى سماتها الأساسية هي أن أيّ «صمام مقوِّم للتيار» بإمكانية جهد حقيقي أعلى بعد دورة الاشتعال يفوق التيار الناتج من أيّ صمام مقوِّم للتيار أمامه Heumann (1996).

يُستخدَم العاكس ذو التبديل الخارجي المتحكَّم بواسطة الشبكة عادة لتطبيقات القدرة العالية. أما لتطبيقات القدرة المنخفضة (الأقل من 1 MW)، الشائعة جداً لأنظمة تزويد القدرة الفولتضوئية، فإن العاكسات ذات التبديل الذاتي هي التقنية الأحدث.

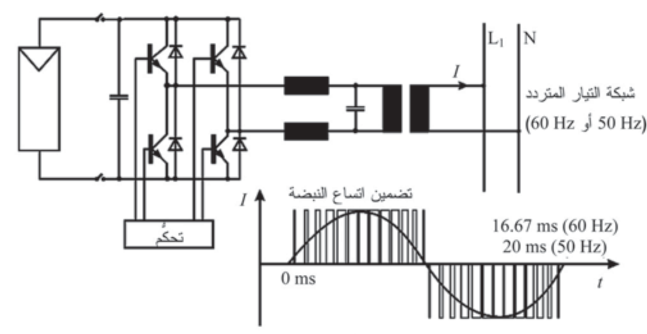
3-3-2 عاكسات ذات تبديل ذاتي

العاكسات ذات التبديل الذاتي (Self-Commutated Inverters) لا تحتاج إلى مصدر جهد متردد خارجي من أجل عملية التبديل (انظر

المعيار DIN 41750 الجزء 5). ويتم تزويد جهد التبديل إما بواسطة جهاز تخزين للطاقة الذي هو جزء من العاكس (عادة بسعة «حذف») أو عن طريق زيادة مقاومة صمام مقوِّم التيار الذي سيتم فصله (مثلاً، ترانزستور القدرة MOS-FET أو الترانزستور IGBT). وقد صُممت العاكسات ذات التبديل الذاتي لجميع أنواع تحويلات الطاقة الكهربائية لتدفقات الطاقة في اتجاه واحد أو في كِلا الاتجاهين. وفي مدى القدرة المتعلقة بالتطبيقات الفولتضوئية (الأقل من 1 MW) في الوقت الحاضر تُستخدم العاكسات ذات التبديل الذاتي بشكل خاص.

3-3-3 عاكسات تستند إلى تضمين اتساع النبضة

العاكس ذو التبديل الذاتي، الذي له جهد (وتيار) مُخرج يتم التحكم به بواسطة النبضات، يسمى عاكس النبضة (PWM). في هذا النوع من العاكسات، عدد التبديلات لكل فترة يزداد عن طريق الوصل والقطع المتكرر عند تردد النبضة f_p خلال هذه الفترة، والذي يمكن استخدامه لخفض توافقيات التيار والجهد، لأنه يساوي الزيادة في أعداد النبضة. وفي العاكسات المتحكَّمة بواسطة الشبكة، زيادة أعداد النبضة تتحقق فقط بواسطة زيادة ملائمة لدعائم تقويم العاكس. يبيّن الشكل (3-3) التوصيل المزدوج لمصدر جهد مباشر (مولد فولتضوئي) بمصدر جهد متردد بواسطة عاكس نبضة في دائرة قنطرة أحادية الطور.



الشكل (3-3): مخطط لدائرة عاكس جيبي أحادي الطور يستند على تضمين اتساع النبضة لحقن الفولتضوئية في الشبكة.

تتحدد توافقيات التيار عن طريق المحاثات الموجودة في جانب التيار المتردد. وبهذا، لتحقيق توجيهات المرافق العمومية بخصوص التغذية الشبكية (EN 60555)، يجب الحفاظ على أدنى محاثة معينة.

العاكس المبيّن في ملحق الشكل (3-3) مجهز بمرشح إمرار الترددات المنخفضة ومحوّل عزل، وبهذا فإن جميع التوافقيات حتى الرتبة n يتم حذفها، حيث n تمثل عدد النبضات خلال كل فترة للتيار المتردد. لترددات العكس المرتفعة، يزداد الفقد بالعكس في أجهزة القدرة الإلكترونية. وعند ترددات العكس المنخفضة، تزداد نفقات مرشح إمرار الترددات المنخفضة. بالرغم من أنه للتيار الجيبي تنبض القدرة المحقونة في الشبكة الأحادية الطور بضعف التردد، إلاّ أن التيار المباشر القادم من المولد الفولتضوئي يتراكب بواسطة التيار الجيبي بتردد يساوي ضعف تردد الشبكة.

3-4 الربط الشبكي الكهربائي

3-4-1 مستويات الجهد للشبكات الكهربائية

مستويات الجهد للربط الشبكي بالشبكات الكهربائية العمومية

(التوصيات وفقاً للمعيار VDE/IEC، وبين القوسين المربعين الممارس فعلياً في أوروبا) هي:

جهد منخفض:	230/400 V	تزويد المستهلكين الصغار في المنازل، والزراعة، والصناعة.
جهد متوسط:	10 kV [12 kV]	أنظمة الشبكة العمومية والصناعية.
جهد عالٍ:	110 kV [123 kV] 220 kV [245 kV] 380 kV [420 kV]	لنظام الشبكة في كافة أرجاء المدينة اعتماداً على الفراغ والسعة.
جهد عالٍ:	756 kV	لأنظمة الشبكة في كافة أرجاء المدينة، ونقل القدرة العالية لمسافات بعيدة.

3-4-2 القيم الحدودية للشبكات الكهربائية

العاكسات المستعمَلة يجب أن تحقق المتطلبات التي تم تهيئتها بواسطة المَرافق (وبشكل أساسي تلك المتعلقة بالتوافقيات القصوى) وذلك لمقاومة التأثيرات المحتملة بواسطة الجهد الزائد للشبكة على العاكس (أو التغير المفاجئ للجهد).

يتم وصف التجاوزات الطويلة والقصيرة المدى المسموح بها للجهد والمحددة من أجل توصيل العاكسات بالشبكات المترددة. ويتم تنظيم الانحراف المقبول من الشكل الجيبي المثالي أيضاً. كما يجب أيضاً الأخذ بعين الاعتبار تأثير تشغيل العاكس على شكل جهد الشبكة، وخصوصاً في أثناء فترة تبديل العاكس. وللتجاوزات الطويلة المدى المسموح بها لجهد الشبكة، فإن تقلُّب قيمة جذر متوسط مربع الجهد المتردد بين 90 في المئة و110 في المئة من الجهد الاسمي للشبكة يكون مسموحاً به (وفقاً للمعيار VDE 160، الجزء

الثاني والمعايير الدولية). وبالإضافة إلى التقلبات الطويلة المدى للجهد، قد تحدث أيضاً جهود كهربية زائدة غير دورية قصيرة المدى؛ وحجمها مشروط بواسطة التطور الزمني. تتراوح قيم هذه الجهود من 1.5 ـ 2 ضعف الجهد الاسمي للمولدات المفرَّغة (الحرة غير الموصلة بحِمل) إلى 10 ـ 100 ضعف للمولدات الساكنة. كما يجب تحديد الارتفاعات المفاجئة للجهد إلى 2.5 ضعف الجهد الاسمي من خلال استعمال أجهزة ماصة للتغيّر المفاجئ في الجهد على الأقل في شبكات الجهد العالية والمتوسطة.

3-4-3 نقل الكهرباء إلى مسافات بعيدة

للمسافات الأبعد من 1500 km، نقل الجهد العالي للتيار المباشر (HVDC) له عادة ميزات أكثر من النقل بواسطة التيار المتردد. بالإضافة إلى ذلك، يوفر هذا النقل المميزات الآتية: جهود كهربائية قصوى متدنية، وبالتالي فإن العوازل ومسافات الأمان يمكن أن تكون أقل، ما تؤدي إلى آثار بيئية أقل (لممرات المناظر الطبيعية) للقدرة الكهربائية المنقولة نفسها. ولا توجد هناك مشاكل مفاعلة وقابلية (تأثرية) كهرومغنطيسية أيضاً. وقد تم تطبيق تقنية الجهد العالي للتيار المباشر لأكثر من 25 سنة في تقنية الطاقة الكهربائية ويمكن اعتبارها متطورة. وإجمالاً، فإن 11000 km من خطوط النقل هي الآن في الخدمة، و4500 km إضافية هي تحت الإنشاء.

على سبيل المثال، لقد تم نقل قدرة كهربائية 6300 MW بواسطة نظام الجهد العالي للتيار المباشر من إجمالي (600 kV ±) 1.2 MV في البرازيل منذ عام 1994، مغطية مسافة 805 km من المحطة 12.6 GW للقدرة المائية الواقعة في منطقة إيتابو بمدينة فوز دي إغواسو إلى منطقة إيبيونا في مدينة ساو باولو. يتم تحويل الجهد 18 kV، 50 Hz ذي الطور الثلاثي المتردد الناتج من المولد الكهربائي إلى 525 kV في

المرحلة الأولى ومن ثم تقويمه في محطة التقويم الواقعة في فوز دي إيجيس. وبعد النقل البعيد المدى بواسطة الخط الموجب 600 kV والسالب 600 kV، تتم عملية عكس الجهد العالي للتيار المباشر في منطقة إيبيونا إلى التردد المعتاد 60 Hz[2]، وأخيراً حقنه في الشبكة الكهربائية العمومية لشبكة ساو باولو، وهي ثاني أكبر مدينة في العالم. وفي مشروع IKARUS[3] الألماني، تم استخدام الكهرباء الشمسية المستورد إلى ألمانيا كمرجع لوصف خط نقل الجهد العالي للتيار المباشر 2 GW عند 400 kV (الجدول (3 ـ 1)(ب)).

لتوصيل محطة القدرة الفولتضوئية الواقعة في جنوب إسبانيا إلى المستهلكين في ألمانيا، طول خط نقل الجهد العالي للتيار المباشر بين المحطات الطرفية هو 2000 km. وللتوصيل من شمال أفريقيا إلى ألمانيا، افتُرض طول 1200 km من خطوط النقل الواقعة في القارة الأفريقية أن تصل إلى مناطق ذات إشعاعية شمسية عالية جداً. فتم ربط كابل بحري بطول 200 km من تونس إلى صقلية، وبعد ذلك ربط 1900 km خط نقل آخر فوق أرضي لوصول الكهرباء أخيراً إلى ألمانيا. متوسط الكفاءة السنوية هو 88 في المئة للربط من إسبانيا و84 في المئة للربط من أفريقيا. وهذا

(2) استخدام الجهد العالي للتيار المباشر يمنح ميزة إضافية لهذه الحالة: خلافاً لعملية النقل، فإن تردد 60 Hz بواسطة تسعة من وحدات التوليد 715 MW الثمانية عشر يتم تحويلها إلى 60 Hz. ولأسباب سياسية ـ تقع محطة القدرة على خط الحدود الفاصلة بين البرازيل (شبكة عمومية 60 Hz) والباراغواي (شبكة عمومية 50 Hz) ـ فقد تم بناء نصف المولدات بتردد 50 Hz، بالرغم من أن الباراغواي تستخدم فقط 2 في المئة من الطاقة المتولدة، بينما تستخدم البرازيل جميع الطاقة المتبقية.

(3) IKARUS: أدوات لتطوير استراتيجيات خفض انبعاثات غاز الدفيئة الناتج عن استخدام الطاقة. وهو مشروع تبنّته وزارة العلوم والتكنولوجيا الألمانية ـ انتهى في آذار/ مارس 1995.

يعني أن الفقد بواسطة النقل يتراوح ما بين 12 في المئة إلى 16 في المئة، وهذا يساوي 0.5 في المئة لكل 100 km من النقل و1.5 في المئة للمحطات الطرفية. تكاليف المحطات الطرفية هي 84.4 €/kW، وتكاليف خطوط النقل فوق الأرضي هي 30675 €/km، وتكاليف الكابل البحري هي 1.02 مليون يورو لكل كيلومتر. وبهذا، فإن إجمالي تكاليف الاستثمار أقل بقليل من 1.02 بليون يورو للتوصيل من جنوب إسبانيا إلى ألمانيا، و1.53 بليون يورو للتوصيل من شمال أفريقيا - أي حوالى 30 في المئة فقط من تكاليف التمويل السنوي لتعدين الكربون في غرب ألمانيا (انظر الجدول (أ ـ 6) في الملحق).

الجدول (3-1) (ب): نقل الجهد العالي للتيار المباشر إلى وسط أوروبا من مواقع مختلفة.

الموقع	جنوب إسبانيا	شمال أفريقيا	جمال (منطقة في أفريقيا)	شمال شرق أفريقيا
قدرة (إجمالية)	2000 MW	2000 MW	26500 MW	72414 MW
قدرة (صافية)	1760 MW	1679 MW	24644 MW	67055 MW
جهد	400 kV	400 kV		
تيار	2×2.5 kA	2×2.5 kA		
خط نقل (فوق أرضي)	2.000 km	3.100 km		
خط نقل (كابل بحري)	0 km	200 km	4100 km	5100 km
الكفاءة خلال العام	88 في المئة	84 في المئة	93.1 في المئة	92.6 في المئة
تكاليف خطوط النقل (فوق أرضي)	0.62 بليون يورو	0.95 بليون يورو	7.8 بليون يورو (بحري وأرضي)	24.6 بليون يورو (بحري وأرضي)

يتبع

تكاليف الكابل البحري		0.20 بليون يورو		
تكاليف خطوط النقل (بحري)	2x0.17 بليون يورو	2x0.17 بليون يورو	1.63 بليون يورو	4.46 بليون يورو 4.13 بليون يورو
تكاليف تشغيل	3 مليون يورو/ سنة	4.3 بليون يورو/ سنة	111 مليون يورو/ سنة	262 مليون يورو/ سنة
تكاليف النقل	20 ـ 60 ϵ/MWh	25 − 77 ϵ/MWh	3.0 ϵ/MWh	3.8 ϵ/MWh

المراجع: (Staiβ) 1996. العمر الزمني لخط النقل: 30 سنة؛ وموظفو التشغيل: 40 وأيضاً 49 شخص؛ وتكلفة النقل بمعدل فائدة 4 في المئة لكل سنة.
(Czisch, G.)، معهد تكنولوجيا الطاقة الشمسية (ISET)، 1999. العمر الزمني لخط النقل: 25 سنة؛ وموظفو التشغيل: 49 شخص؛ ومعدل الفائدة: 5 في المئة/ سنة.

باستعمال تقنية التيار، فإن تكاليف الكهرباء الفولتضوئية المستوردة التي يتم توزيعها بواسطة الشبكة العمومية في ألمانيا باستخدام التقنية المتوافرة اليوم هي 0.2 ϵ/kW.h إلى 0.34 ϵ/kW.h. ومقارنة بالتوليد المحلي للكهرباء الفولتضوئية في ألمانيا، فإن هذه التكاليف أقل من النصف. واستيراد الكهرباء الشمسية توفر ميزات إضافية: التقلُّب ذو المدى القصير لتوليد الكهرباء نتيجة إشعاعية أقل شيوعاً؛ وبالرغم من أن الإشعاعية الكلِّية أعلى، إلاّ أن التغيرات الموسمية للإشعاعية أقل أهمية.

الفصل الرابع

التخزين

في أغلب الأحيان، يتم الاحتياج إلى الطاقة الكهربائية خلال فترات أخرى من الزمن غير الزمن الذي يتم فيه توليد الطاقة الكهربائية. وفي الحالة التي يكون فيها الربط الشبكي الكهربائي غير ممكن، يجب تخزين الطاقة في الفترة ما بين التوليد والاستهلاك. من حيث المبدأ، هناك العديد من الأنواع المختلفة الممكنة لتخزين الطاقة مثل:

أ ـ التخزين الكهربائي

أ ـ 1: المكثفات (غالية، والتفريغ الذاتي لها عالي نسبياً، وتستخدم في الوقت الحاضر للتخزين القصير المدى، مثلاً، المكثفات ذات العلامات التجارية "Gold-Caps" و"Ultra-Caps").

أ ـ 2: المحثات (سعة تخزينية صغيرة، وجهد عالٍ، ولا تُستخدم عملياً).

ب ـ التخزين الميكانيكي

ب ـ 1: طاقة حركة (الحدّافة (Flywheel)، تُستخدم في بعض الأحيان للتخزين القصير المدى والمتوسط الحجم للقدرة الكهربائية).

ب ـ 2: طاقة وضع (تخزين مائي في الارتفاعات العالية، مثلاً، البحيرات الجبلية، والمضخات بالاشتراك مع توليد القدرة الكهرومائية).

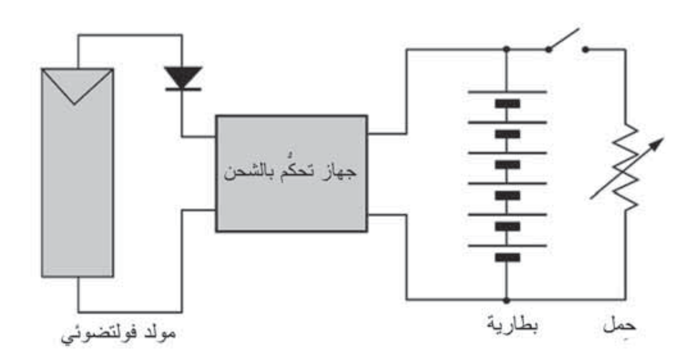
ج ـ التخزين الكيميائي

ج ـ 1: التحليل الكهربائي (التحليل الكهربائي للماء إلى

هيدروجين وأكسجين كوسط خازن، وبعد ذلك الحرق أو التحويل إلى كهرباء بواسطة خلايا الوقود (Fuel Cells)).

ج ـ 2: الكهروكيميائي (التحويل الكيميائي للمادة المنحلَّة (الإلكتروليت) والقطبين يولّدان جهداً كهربياً (أول من اكتشف ذلك هو أليساندرو فولتا (Alessandro Volta). حيث الاسم «فولتية» (Voltage) مشتق منه). ويتم إجراء عكس هذه العملية «الشحن» بتطبيق جهد على القطبين).

الطريقة الشائعة جداً لتخزين الكهرباء لأنظمة الطاقة الفولتضوئية هي التخزين الكهروكيميائي بواسطة بطارية الرصاص مع حمض الكبريتيك كمادة منحلَّة «إلكتروليت» (Electrolyte). ولهذا، سيتم مناقشة هذه الطريقة بالتفصيل. أما العمليات الأخرى فليست شائعة جداً وبالتالي سيتم ذكرها بشكل مبدئي فقط.



الشكل (4-1): رسم تخطيطي لنظام فولتضوئي بأداة تخزين بطارية كيميائية.

4-1 بطارية حمض كبريتيد الرصاص

بطاريات حمض كبريتيد الرصاص، تسمى أيضاً «حمض الرصاص»، التي تم اختراعها في عام 1859 من قِبَل الفيزيائي

الفرنسي غاستون بلانتي (Gaston Planté)، هي البطاريات القابلة لإعادة الشحن والمستخدمة بشكل شائع جداً في الوقت الحاضر، على الأقل لمتطلبات السعة العالية. ومع أن نسبة الطاقة ـ إلى ـ الحجم مقبولة، إلاّ أن نسبة الطاقة ـ إلى ـ الوزن تعتبر قليلة نسبياً مقارنة بأنواع البطاريات الأخرى. وهي رخيصة نسبياً ويمكن أن توفر تيارات عالية جداً. وكل خلية بطارية لها جهد اسمي 2 V، والذي يمكن زيادته بالتوصيل المتوالي لخلايا البطاريات.

4-1-1 فكرة عملها

يوضع لوحان قطبيان كهربائيان، أحدهما يتكون من رصاص نقي والآخر بسطح من أكسيد الرصاص، في إلكتروليت يتكون من حمض الكبريتيك المخفف (عادة 37 في المئة H_2SO_4). في أثناء عملية التفريغ، يتحول كِلا القطبين الكهربائيين إلى كبريتات رصاص ($PbSO_4$) ويتحول الإلكتروليت إلى ماء، ولهذا فإن بطاريات حمض الرصاص يمكن أن تتجمد. وفي أثناء عملية الشحن، يتحول كبريتات الرصاص على القطبين الكهربائيين مرة أخرى إلى أكسيد الرصاص (PbO_2 عند القطب الموجب) وعجينة رصاص (Pb عند القطب السالب)، وتعاد أيونات الكبريتات مرة أخرى إلى محلول الإلكتروليت لتكوين حمض الكبريتيك (انظر معادلة التفاعل الكيميائي الآتية).

$$PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4 = 2PbSO_4 + 2H_2O$$

4-1-2 إطلاق الغاز

ينطلق الغاز عندما يتم تغذية تيار أكبر إلى البطارية من التيار الذي يمكن أن تستخدمه. يقوم التيار الزائد بإنتاج غازَيْ الهيدروجين والأكسجين. بعض عمليات إطلاق الغاز تعتبر عادية، إلاّ أن إطلاق

غاز زائد يمكن أن يدل على أن البطارية تقوم بالشحن الزائد. والغازات المنطلقة هي مواد قابلة للانفجار إذا تعرضت إلى شرارة أو لهب، ولهذا يتم توفير تهوية ملائمة. تبدأ البطاريات عادة بإطلاق الغاز عند حوالى 80 في المئة ـ 90 في المئة من الشحن الكامل. والفكرة الخاطئة هي إيقاف عملية الشحن بمجرد أن تبدأ البطارية بإطلاق الغاز. ومعظم البطاريات تبدأ بإطلاق الغاز عند حوالى 80 في المئة من بدء الشحن، وبالتالي فإن الشحن يتوقف عند نقطة إنتاج الغاز، ولن تصل البطارية أبداً إلى الشحن الكامل. لمنع إطلاق الغاز الزائد، فإن معظم أجهزة الشحن الممتازة تقلل من التيار عندما تصل البطارية إلى هذه النقطة.

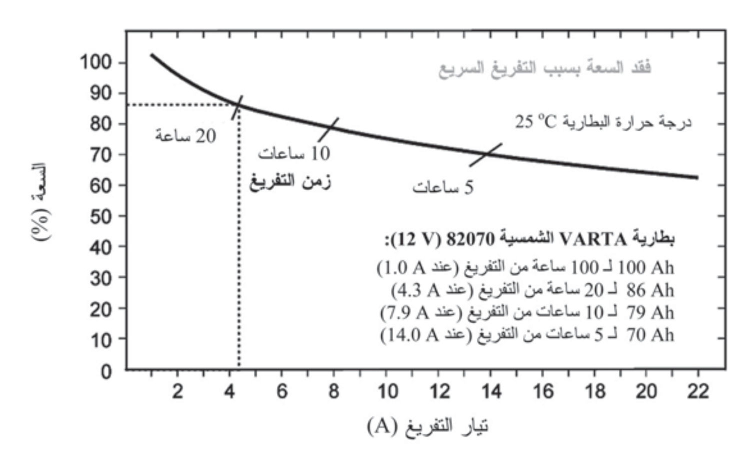
إطلاق الغاز في البطاريات الهلامية المصمتة: البطاريات الهلامية (Gel) تقاوم بشكل أقل جداً من البطاريات السائلة عملية إطلاق الغاز الكثيف. ويمكن للهلام أن يقوم بتكوين فقاعات كبيرة أو «جيوب» تعمل على خفض سعة البطارية نتيجة التوصيل الرديء بالألواح. كما يمكن لهذه الجيوب أيضاً أن تؤدي إلى جفاف الهلام بسبب فقدان الماء، ما تجعل هذه الجيوب دائمة. ويتم شحن البطاريات الهلامية بجهد أقل قليلاً من البطاريات السائلة، أي أقل بمقدار 0.1 إلى 0.3 V لتفادي إطلاق الغاز الزائد. وقد ذكرت بعض الإعلانات وأدلّة المنتج بأن البطاريات الهلامية لها سعة «عالية» لتحمُّل الشحن، إلاّ أن ذلك ليس صحيحاً، لأن إمكانية شحنها هو ½ إلى ¼ التيار الأقصى الذي يمكن أن تتحمله البطارية السائلة.

4-1-3 الثقل النوعي

الثقل النوعي ((Specific Gravity (SG)) هو القياس المستخدم للتعبير عن قوة الإلكتروليت. والثقل النوعي يقارن وزن الإلكتروليت إلى الماء (ثقله النوعي 1.000 kg/l). ويتغير الثقل النوعي مع درجة

الحرارة، ولهذا فإن معظم الهيدرومترات تأتي بمخطط تصحيح. الشحن الكامل لبطارية يجب أن يكون حوالى 1.265 عند 25 °C، ومع ذلك فهذا يتغير مع درجة الحرارة. ولا يمكن قياس الثقل النوعي في البطاريات المصمتة. وثقل الحمض الخالص النوعي هو 1.835 kg/l. والبطارية المفرغة بالكامل لها ثقل نوعي حوالى 1.120 kg/l. وينبغي عدم قياس الثقل النوعي مباشرة بعد إضافة الماء لأن القراءة لن تكون دقيقة حتى يمتزج الإلكتروليت تماماً مع الماء. وهذا قد يستغرق ساعات أو أيام، إلاّ أن شحن التعديل يمكن أن يعمل على تسريع العملية كثيراً. والثقل النوعي في العديد من بطاريات «حصيرة الامتصاص الزجاجية» (Absorption Glass Mat (AGM)) قد يصل إلى 1.365 إلاّ أنه لا توجد طريقة عملية للقياس. إذا حصلت على بطاريات جديدة، قم أولاً بشحنها كاملاً، وتعديلها، ومن ثم أخذ قراءة الثقل النوعي كمرجع مستقبلي، لأن جميع الشركات المصنِّعة للبطاريات لا تستخدم القيمة نفسها للثقل النوعي، كما إن الثقل النوعي قد يتفاوت أيضاً للبطارية نفسها التي تم شراؤها في ظروف مناخية مختلفة.

الهيدرومتر (Hydrometer) هو أداة تستخدم لقياس الثقل النوعي للإلكتروليت في البطارية. الثقل النوعي لمعظم بطاريات حمض الرصاص سيكون في حدود 1.1 إلى 1.3 kg/l، وللبطاريات المشحونة كاملاً سيكون حوالى 1.23 إلى 1.30 kg/l. وبعض البطاريات المصنَّعة للاستخدام في المناخ الحار جداً أو المناخ البارد جداً قد يكون لها حمض أقوى أو حمض أضعف. في هذه الحالة، يتم عادة الإشارة إلى ذلك على البطارية. كفاءة الطاقة لبطارية هي دالة في تيار التفريغ (انظر الشكل (4 ـ 2)). وتيارات التفريغ العالية تؤدي إلى كفاءات أقل، كما تقصر من العمر الزمني للبطارية، وبالتالي يجب تجنبها.



الشكل (4-2): السعة القابلة للاستعمال كدالة في تيار التفريغ لبطارية حمض رصاص شمسية 12 V بسعة مصنَّفة 100 Ah (لـــ 100 ساعة من التفريغ).

4-1-4 درجة حرارة التشغيل

الأعمار الزمنية لبطاريات حمض الرصاص تنخفض بنسبة 50 في المئة لكل 10 K من درجة الحرارة فوق 25 °C. ونتيجة للحرارة النوعية العالية للبطارية، فإن درجات حرارة التشغيل القصوى للبطارية أقل من درجات حرارة الوسط المحيط القصوى. ويتطلب تعديل درجة الحرارة لطريقة الشحن في التطبيقات التي تتغير فيها درجة الحرارة بشكل ثابت أعلى من ± 5 K. ويوصى بتركيب حساس درجة الحرارة من أجل درجة حرارة تشغيل البطارية عند القطب الموجب وعزله حرارياً عن درجة حرارة الوسط المحيط.

4-1-5 التفريغ الذاتي

يحدث التفريغ الذاتي عندما تكون البطارية في دائرة مفتوحة، وبشكل أساسي نتيجة التفاعل بين القطبين والإلكتروليت. يتحول الرصاص الناتج من القطب السالب إلى كبريتيد رصاص وفقاً للمعادلة الآتية:

$$Pb + H_2SO_4 \Rightarrow PbSO_4 + H_2$$

عند القطب الموجب، يُختزل ثاني أكسيد الرصاص إلى كبريتيد الرصاص أيضاً بحسب المعادلة الآتية:

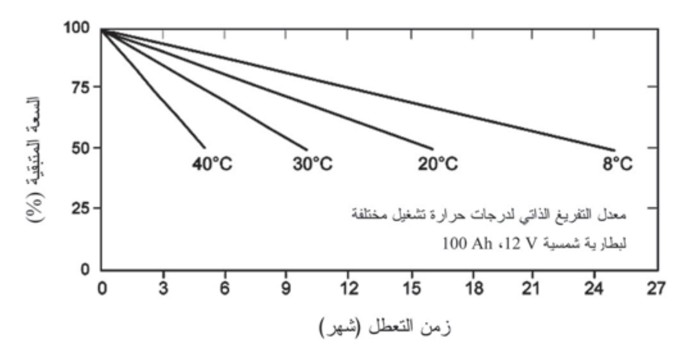
$$2PbO_2 + 2H_2SO_4 \Rightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O + O_2$$

أضف إلى ذلك، يحدث تفاعل تآكل مع شبكة القطب الموجب وتنشأ طبقة كبريتية (تكبْرُت) كالآتي:

$$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \Rightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O$$

يؤدي هذا التفاعل للتفريغ الذاتي إلى تصاعد غاز وانخفاض في سعة تركيز حمض الكبريتيك. ومعدل التفريغ الذاتي يصبح أكبر مع ارتفاع درجات الحرارة (انظر الشكل (4-3)) وزيادة عدد دورات الشحن/التفريغ. وهذا صحيح بشكل خاص في البطاريات التي بشبكات تحتوي على الأنتيمون.

جهد الغمر (Float Voltage) هو الجهد الذي تكون عنده البطارية «مغمورة»، أو عندما يتم فقط تزويد تيار كافٍ لمعادلة التفريغ الذاتي للبطارية. وهذا الجهد عادة هو حوالى 14.2 V إلى 14.5 V للبطارية 12 V .

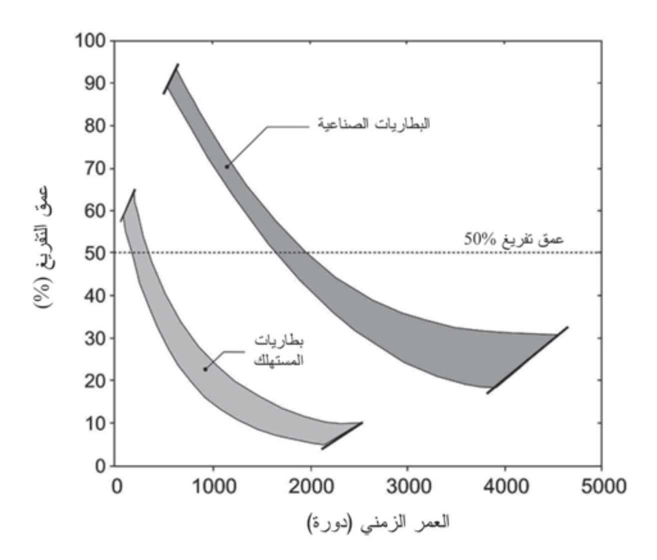


الشكل (4-3): التفريغ الذاتي النسبي لبطارية حمض الرصاص شمسية 12 V، 100 Ah كدالة في زمن التعطُّل ودرجة حرارة التشغيل.

4-1-6 التفريغ العميق

بالرغم من أن الأنواع الأخرى من البطاريات (مثلاً، بطاريات NiCd) يمكن استخدامها حتى سعتها الكاملة، إلاّ أنه يجب تجنب ذلك في بطاريات حمض الرصاص. فكلما كبر «عمق التفريغ» ((Depth of Discharge (DOD) كلما قصر العمر الزمني للبطارية (انظر الشكل (4-4)). وهذا يعود إلى التركيز المخفض لحمض الكبريتيك مع زيادة عمق التفريغ. في حمض الكبريتيك المخفف، يكون انحلال $PbSO_4$ (الناتج الأساسي للتفريغ) عالياً جداً. ونتيجة لتكبْرُت القطب يلاحظ حدوث دائرة قِصَر وتآكل قوي.

للتقليل من هذه المشاكل، يتم السماح للبطارية بالتفريغ حتى عمق تفريغ 50 في المئة في البطاريات المستخدمة لبدء التشغيل، والإضاءة، والاشتعال ((Starting, Lighting, and Ignition (SLI) أو في بطاريات السيارات؛ وعمق تفريغ 80 في المئة باستخدام البطاريات الصناعية. وعلى أيّ حال، من الصعب جداً تحديد القيمة النهائية لعمق التفريغ. ومعظم أجهزة التحكم الشمسية الحديثة جداً تقوم بقطع تيار الشحن عند جهد تفريغ ثابت (جهد القطع) والذي يساوي تقريباً القيمة الحرجة لعمق التفريغ. إلاّ أن جهد القطع يعتمد على الحِمل، وهناك القليل فقط من أجهزة الشحن *I-I* الشمسية يمكنها أن تشتمل على هذا، مثل أجهزة التحكم الشمسية "Solarix" المُنتَجة بواسطة شركة Steca في ألمانيا.



الشكل (4-4): انخفاض العمر الزمني للاستعمال لمختلف أنواع بطاريات حمض الرصاص كدالة في زيادة عمق التفريغ.

في عمليات التنصيب الكبرى للفولتضوئية، يتم توصيل مولِّد ديزل إذا تم بلوغ القيمة الحرجة لعمق التفريغ (نظام فولتضوئي ـ ديزل هجين). ولوحدات البطاريات الأصغر، فإن استخدام نظام داعم لا يبدو منطقياً، بالرغم من أن زيادة حجم البطارية يمكن أن يكون الطريقة العملية لتفادي التفريغ العميق. وبطاريات حمض الرصاص الشمسية الكبيرة نادراً ما يتم توصيلها وهي غالية جداً. هناك بعض البطاريات الشمسية التي تم تطويرها حديثاً لهذا الغرض، مثل تلك المُصنَّعة بواسطة شركة Akku Gesellschaft في ألمانيا، بسعة مصنَّفة 240 Ah عند 12 V وتركيز 1.22 kg/l، حيث تزداد السعة إلى 260 Ah إذا ارتفع تركيز حمض الكبريتيك إلى 1.28 kg/l. لهذه البطارية عمر متوقع ما بين خمس إلى ست سنوات أو 800 دورة (عمق تفريغ 50 في المئة).

4-1-7 التكَبْرُت

التكبْرُت (Sulfation) هو تشكُّل بلورات كبيرة من $PbSO_4$، الذي هو ناتج التفريغ الأساسي لبطارية حمض الرصاص. وبالرغم من أن كبريتات الرصاص يتم تكوينها بمواد الألواح في أثناء التفريغ العادي، إلاّ أن هذا التعبير استُخدِم لوصف تكوُّن شكل مختلف (بلورات كبيرة) من كبريتات الرصاص الذي لن يتحول مرة أخرى بسهولة إلى المادة العادية عندما تم شحن البطارية. ومن الصعب جداً شحن كِلا القطبين عند وجود هذه البلورات الكبيرة. ويحدث التكبْرُت عادة بعد التفريغ بتيارات منخفضة (أي تيارات التفريغ الذاتي) نتيجة تطبُّق (تكوُّن طبقات) وتبلور الحمض. وتحدث هذه العملية أيضاً عندما يتم تخزين البطارية لفترة طويلة من الزمن في حالة مفرغة، إذا لم يتم شحنها كاملاً، أو إذا أصبح مستوى الإلكتروليت منخفضاً بصورة غير عادية نتيجة الفقد المتزايد للماء من عملية الشحن الزائد و/أو التبخير. ويمكن تصحيح التكبْرُت غالباً عن طريق الشحن البطيء جداً (بتيار منخفض) عند جهد أعلى من المعتاد، عادة عند حوالى 2.4 إلى 2.5 V لكل بطارية عند 0.5 إلى 8 A (اعتماداً على حجم البطارية). وهذا سيزيل التكبْرُت تدريجياً في معظم الأحوال.

4-1-8 أنواع البطاريات

تُستخدَم بطاريات حمض الرصاص لعدد كبير من التطبيقات: التخزين الطويل المدى، وتطبيقات إنتاج التيار القصير المدى، وكفاءات الطاقة العالية، والعمر الزمني الطويل، والوزن المنخفض، والصيانة المنخفضة، والتكلفة المنخفضة... إلخ، ولا توجد هناك بطارية يمكن أن تحقق كاملاً جميع الخصائص. وهناك أنواع مختلفة

من المنتجات في السوق سيتم وصفها أدناه. وبالرغم من أن التكاليف تعطى أساساً بحسب المواد والتقنية المستخدمة، إلاّ أنها تعتمد أيضاً على السعة الإنتاجية، والشركات المتنافسة، وشهرة بعض أحجام البطاريات، والتي يمكن رؤيتها في الشكل (4-5).

4-1-8-1 بطاريات السيارات

بطاريات بدء التشغيل، والإضاءة، والاشتعال (SLI) تم تطويرها لبدء تشغيل محرك السيارات. وهذا النوع من البطاريات مصمم لإنتاج قدرة عالية قصيرة المدى وليس للدورة العميقة. إلاّ أن هذا النوع غالباً ما يُستخدم للتطبيقات الشمسية لأنه رخيص الثمن نسبياً ومتوفر بسهولة. والعمر الزمني لهذا النوع من البطاريات قصير نسبياً (سنة واحدة إلى أربع سنوات). كما إن عمق التفريغ الأقصى ينبغي ألاّ يكون أعلى من 50 في المئة. وإذا لم يتم استعمال هذا النوع من البطاريات لفترة طويلة من الزمن، يجب الاحتفاظ به تحت شحن نضيض التيار (شحن يكفي لإبقاء البطارية معبّأة) أو، بدلاً من ذلك، إعادة شحنه كل شهرين. والتخزين الموسمي صعب مع هذا النوع من البطاريات إذا لم يكن هناك مصدر آخر متوافر من الطاقة غير الطاقة الشمسية. ولتفادي تطبُّق الحمض، وبالتالي التكبْرُت، يمكن إعادة شحن البطارية عند جهد إطلاق الغاز لفترة قصيرة، أو شحنها مباشرة من دون المتحكِّم الشمسي بواسطة المولد الفولتضوئي لمدة دقيقتين إلى 5 دقائق مرتين في الأسبوع. وعملية الرج الميكانيكي للبطارية غير مجدية، لأن الفراغ بين الألواح صغير جداً لضمان إعادة الخلط.

4-1-8-2 البطاريات الصناعية

تُستعمل البطاريات الصناعية للتطبيقات الساكنة والتطبيقات المتعلقة بالجر والسحب وبشكل أساسي أيضاً للتطبيقات الدورية. وهذا يتحقق باستخدام ألواح سميكة مسطحة وأقطاب أنبوبية. ويتم

حماية الكتلة الفاعلة في النوع الأنبوبي بواسطة واقي بلاستيكي لتفادي تقشُّر الكتلة. ويُستخدَم النوع الأنبوبي بشكل متكرر في التطبيقات الشمسية، لأن تكاليفه المحددة للكيلووات ـ ساعة منخفضة نسبياً.

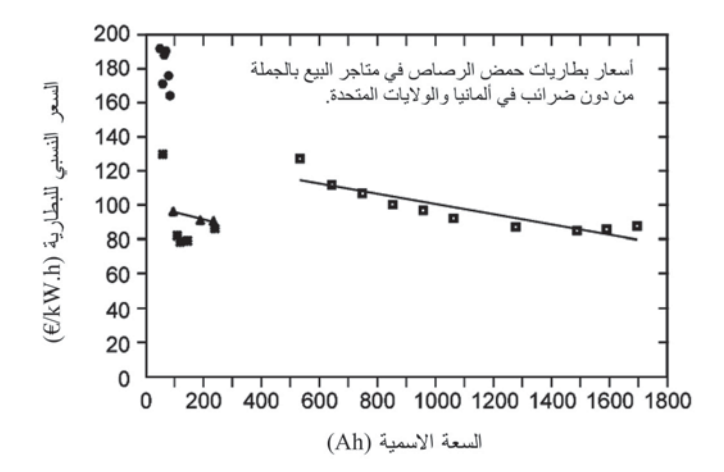
4-1-8-3 البطاريات الشمسية

يتم اشتقاق هذه الأنواع الخاصة من البطاريات من بطاريات SLI والبطاريات الصناعية من خلال تحسين خاصية دورتها. وتتبنى معظم شركات البطاريات طريقة بطارية SLI معدّلة لأن التقنية الأساسية غير مكلفة نسبياً. والمساوئ الأساسية لبطارية SLI العادية، وهي خاصية الدورة السيئة، يمكن تقليلها من خلال:

-1 استعمال أقطاب كهربائية أكثر سماكة.
-2 استعمال أقطاب كهربائية محتواة في فواصل جيبية خاصة، وبذلك يتم تفادي دوائر القصر الناتجة من تقشُّر الكتلة الفاعلة.
-3 استعمال فائض من الإلكتروليت، وبذلك يتم التقليل من هبوط تركيز الحمض في أثناء التفريغ.
-4 استعمال شبكات مصنوعة من الأنتيمون المخفض أو الخالية من الأنتيمون، وبذلك يتم خفض إطلاق الغاز والتفريغ الذاتي.

4-1-8-4 تنوع البطارية الصناعية

عند استعمال بطاريات صناعية معدَّلة فإن التصميم الأساسي لا يتغير، إلاّ أن حجم الإلكتروليت سيزداد ومحتوى الرصاص لسبيكة الشبكة سيقل. في عمليات التنصيب الكبرى، يتم تركيب مثل هذه البطاريات مع نظام آلي لإعادة تعبئة الماء و/أو مضخة هوائية لمنع تطبُّق الحمض.



الشكل (4-5): الأسعار النسبية لبطاريات حمض الرصاص كدالة في السعة التخزينية الاسمية (معهد تكنولوجيا الطاقة الشمسية (ISET)).

4-1-8-5 بطاريات VRLA (أو «لا تحتاج إلى صيانة»)

عند شحن هذه البطاريات الزائد فإنها تُنتج هيدروجين وأكسجين وهناك فقد مهم للماء أيضاً. في البطاريات المفتوحة، هذا الفقد يحتاج إلى تعويض من حين إلى آخر بإعادة تعبئة البطارية بماء مقطر. وعندما يتم تشغيل البطاريات المصمتة، بشكل ملائم، فإنها تقلل من هذا الفقد. ولهذا السبب تعتبر هذه البطاريات بشكل عام «لا تحتاج إلى الصيانة أو بطاريات «حمض الرصاص ذات الضبط الصمامي» (Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA)). عند الشحن الزائد لهذه البطاريات فإن الصمام يسمح للبطارية بالتهوية، ما يؤدي إلى الفقدان الدائم للسعة لأنه لا يمكن إضافة ماء لهذه البطاريات.

للتقليل من هذا التأثير يمكن محاولة الاسترداد: الأكسجين الناتج عند القطب الموجب يتم نقله إلى القطب السالب، حيث يتم اختزاله مرة أخرى إلى ماء. نقل الأكسجين خلال حمض الكبريتيك

يتم عبر المسامات الغازية المتشكلة في السيليكا أو الليف الزجاجي المستخدم لإيقاف حركة الحمض. ولأن معظم حركة الإلكتروليت يتم إيقافها، تنخفض عملية تطبُّق وتكبْرُت الحمض. ولم يتم تطوير بطاريات VRLA بشكل خاص للتطبيقات الشمسية ولكن يمكن استخدامها لهذا الغرض. وعلى أيّ حال، فإن للبطارية المفتوحة التي يتم صيانتها بشكل جيد عمراً زمنياً أطول من البطارية المصممة VRLA.

4-2 الأنواع الأخرى من البطاريات

4-2-1 بطاريات النيكل ـ كادميوم ((Nickel-Cadmium (Ni-Cd))

تُستخدم بطاريات النيكل ـ كادميوم عادة كبطاريات قابلة لإعادة الشحن للتطبيقات المنزلية، كما يمكن أن تكون ملائمة للأنظمة الفولتضوئية المستقلة. ولهذه البطاريات عدد من الخصائص التي تميزها عن بطارية حمض الرصاص:

- لها كثافة طاقة أعلى من بطاريات حمض الرصاص.
- يمكن تفريغها بشكل كامل، ما يمكن تجاهل الحاجة إلى الحجم الزائد.
- أكثر متانة وقوة.
- لها أداء ممتاز عند درجة الحرارة المنخفضة.
- لها مقاومة داخلية تسمح للتيارات العالية.
- يمكن شحنها وتفريغها بمعدل عالٍ جداً (إلى حوالى 30 دقيقة).
- تحافظ على جهد منتظم نسبياً في أثناء التفريغ.
- لها متطلبات صيانة منخفضة.

إلا أن لهذه البطاريات أيضاً بعض المساوئ عن بطاريات حمض الرصاص:

- سعرها عادة أغلى مرتين.
- لها كفاءات طاقة أقل (75 في المئة).
- إذا لم تُستخدَم البطارية إلى عمقها التفريغي ولم يتم تفريغها بالكامل بشكل متكرر، فإنها تفقد سعتها (وهو ما يسمى بـ «تأثير الذاكرة» ـ في تمييز مضاد لبطارية حمض الرصاص).
- الكادميوم مادة خطرة، ولهذا من المهم التأكد من أن البطارية لا يتم التخلص منها بل إعادة تدويرها بعد العمر الزمني لها للاستعمال.

4-2-2 بطاريات النيكل ـ هيدريد

هذه البطاريات (Nickel-Hydride (Ni-MH) هي مثل بطاريات النيكل ـ كادميوم، ولكن بدلاً من قطب النيكل لها قطب هيدريد معدني. وهذا يسمح لها ببعض من الخصائص المهمة:

- لها سعة حرارية أعلى بمقدار 50 في المئة عن بطاريات النيكل ـ كادميوم.
- مادة القطب أقل خطورة بكثير من الكادميوم.
- تأثير الذاكرة لها أقل من تلك لبطاريات النيكل ـ كادميوم.

في السابق، كان لهذه البطاريات معدل تفريغ ذاتي كبير، إلاّ أن طرق تحسين الإنتاج قللت من هذه المشكلة. ونتيجة ميزاتها المهمة، فإن هذا النوع من البطاريات قد يحل محل بطارية النيكل ـ كادميوم في المدى البعيد.

4-2-3 بطاريات أيون الليثيوم

هذه الأنواع من البطاريات ((Lithium-Ion (Li-Ion) غالية الثمن جداً، إلاّ أن لها بعض الخصائص المهمة:

- لها كثافة طاقة عالية.
- لها كفاءة عالية (كفاءة طاقة 95 في المئة عند درجة حرارة الغرفة وحتى 60 °C).
- حتى عند درجة حرارة 10°C-، فإن كفاءة الطاقة تظل عند 90 في المئة (انظر ((Kuhmann [et al.] (2000)).
- معدل تفريغ ذاتي منخفض بمعدل 2 في المئة إلى 4 في المئة لكل شهر بين 25 °C و 60 °C.
- تعمل حتى عند درجات الحرارة المنخفضة جداً.

يتم التحكم بحساسية بطاريات أيون الليثيوم للجهد المنخفض والجهد الزائد بواسطة دوائر تحكم مدمجة في أغلفة البطارية.

4-2-4 بطاريات النيكل ـ حديد ((Nickel-Iron (Ni-Fe))

تستخدم الخلايا الكهربائية ذات النوع القلوي هيدروكسيد البوتاسيوم كإلكتروليت، وأنود (مَصعد) من رواسب صوف الفولاذ مع مادة حديد فاعلة، وكاثود (مهبط) من رواسب صوف الفولاذ المطلي بالنيكل مع مادة نيكل فاعلة. وهذه هي «خلية أديسون» الأصلية.

الميزات:

- تكاليف منخفضة.
- أعمار زمنية طويلة (3.000 دورة).

المساوئ:

- كفاءة طاقة منخفضة (عادة 55 في المئة).
- معدل عالي جداً للتفريغ الذاتي (عادة 45 في المئة لكل شهر).
- استهلاك عالٍ للماء.
- مدى محدود لدرجة الحرارة (0 °C إلى 40 °C).
- ثقل نوعي عالٍ لكل حجم.

- مقاومة داخلية عالية.

المقاومة الداخلية العالية تؤدي إلى انخفاض كبير في الجهد عبر التوصيل المتوالي للبطاريات. وهذا أيضاً يعني أن الجهد الخارج يتغير مع الحِمل ويشحن أكثر من البطاريات الأخرى. مكونات تكييف القدرة الكهربائية يجب أن تدعم هذا التغير في الجهد. وإذا تم توصيل أجهزة معيّنة عادية تعمل بالتيار المباشر (مثل الثلاجة) إلى البطارية مباشرة فإنها يجب أن تدعم أيضاً هذا التذبذب في الجهد دون أيّ أضرار. الفقد العالي في الشحن والتفريغ سيضيف 25 في المئة إلى 40 في المئة أكثر إلى حجم الألواح الشمسية التي ستحتاجها لاستخدام الطاقة نفسها.

4-2-5 مقارنة بين أنواع البطاريات المختلفة

الجدول (4 ـ 1): مقارنة بين الأنواع المختلفة من البطاريات.

نوع البطارية	التقنية	العمر الزمني حتى 80 في المئة من عمق التفريغ (دورة)	كفاءة الطاقة الكهربائية	التفريغ الذاتي (في المئة لكل شهر)	عمق التفريغ	تكاليف التخزين (€/kWh)	كثافة الطاقة (Wh/kg)	احتياجات الطاقة للإنتاج لكل kWh من السعة التخزينية (معادة التدوير)
حمض الرصاص	شبكة، مقفلة	500	83 في المئة	3	40 في المئة إلى 60 في المئة	0.221	30	137.1 kWh (29.3 kWh)
	أنبوبية، مقفلة	> 1500	80 في المئة	3		0.174		
	شبكة، مصمتة	600	90 في المئة	4		0.226		
	أنبوبية، مصمتة	1500	90 في المئة	4		0.297		
نيكل ـ كادميوم	مقفلة، جيبية	2000	71 في المئة	6	60 في المئة إلى 90 في المئة	0.330	57 (60-45)	499.2 kWh
	مقفلة، ملبَّدة	2000 <	71 في المئة	10		0.641		
	مصمتة، جيبية	1500	71 في المئة	20		0.682		
	مصمتة، ملبَّدة	1500	71 في المئة	20		1.030		
	مصمتة، ليفية	3500	71 في المئة			0.667		

هيدريد النيكل	هيدروكسيد بوتاسيوم كإلكتروليت				60 في المئة إلى 90 في المئة		75 (70-50)	1.287 kWh
أيون الليثيوم	منظومة بدوائر تحكم مدمجة	500 >			80 في المئة	⩾ 1	90 إلى 115	
نيكل ـ حديد		3000	55 في المئة	40		0.338	55	

المراجع: (J. Garche and P. Harnisch): «البطاريات في الأنظمة الفولتضوئية» (*Batterien in PV-Analgen*)، في: (J. Schmid)، الفولتضوئية (*Photovoltaik*)، 1999 (L.1999 . (Gaines، «تأثيرات إنتاج بطاريات السيارات الكهربائية وإعادة التدوير» (*Impacts of EV Battery Production and Recycling*)، ندوة النساء الفنية (Technical Women's Symposium)، نيسان/ أبريل 29 ـ 30، 1996، أرغون، إلينوي، الولايات المتحدة.L.) . (Gaines and M. Sigh، «التأثيرات البيئية والطاقة على إنتاج بطاريات السيارات الكهربائية وإعادة التدوير» (*Energy and Environmental Impacts of EV Battery Production and Recycling*)، ورقة بحث SAEرقم 951865، قدمت في مؤتمر Total Life Cycle Conference. فيينا، النمسا، تشرين الأول/ أكتوبر 16 ـ 19، 1995. بروهم، وماول، ونيسيسنر (T. Brohm, M. Maul, E. Nesissner)، «بطاريات أيون الليثيوم المتقدمة للسيارات الكهربائية» (*Advanced Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles*)، شركة بطاريات VARTA، مركز الأبحاث والتطوير، 65779 كيلخايم، ألمانيا.

4-3 خلايا الوقود

4-3-1 فكرة عملها

أساساً، خلية الوقود (Fuel Cell) المستندة إلى الهيدروجين والأكسجين هي ببساطة جهاز تحليل كهربائي عكسي؛ فإذا تم تغذية وقودها (الهيدروجين والأكسجين) فإنها ستولِّد كهرباء.

تتكون خلية الوقود من قطبين كهربائيين محصورين حول إلكتروليت. يمر الأكسجين خلال أحد القطبين الكهربائيين والهيدروجين خلال القطب الآخر، فيتولد كهرباء، وماء، وحرارة.

يتم تغذية وقود الهيدروجين خلال أنود (مَصعد) الخلية، ويدخل الأكسجين (أو الهواء) إلى خلية الوقود من خلال الكاثود (المهبط). عن طريق مادة حفازة، تنشطر ذرة الهيدروجين إلى بروتون وإلكترون، الذي يأخذ مسارات مختلفة إلى الكاثود. ويمر البروتون خلال الإلكتروليت. تقوم الإلكترونات بتكوين تيار منفصل يمكن استعماله قبل أن تعود الإلكترونات إلى الكاثود لتتحد مرة أخرى مع الهيدروجين والأكسجين في جزيء ماء.

نظام خلية الوقود الذي يحتوي على أداة «لإعادة تشكّل الوقود» يمكن أن يستعمل الهيدروجين من أيّ وقود هيدروكربون ـ من الغاز الطبيعي إلى الميثانول، وحتى الغازولين. وبما أن خلية الوقود تعتمد على التفاعل الكيميائي وليس على الاحتراق، فإن الانبعاثات الصادرة من هذا النوع من الأنظمة يمكن أن تكون أقل بكثير من الانبعاثات الصادرة من أنظف عمليات احتراق الوقود.

4-3-2 أنواع خلايا الوقود

4-3-2-1 حمض الفوسفوريك

هذا النوع من خلايا الوقود هو الأكثر تطويراً من الناحية التجارية. ويتم استخدامه في تطبيقات متعددة مثل المستشفيات، وغرف التمريض، والفنادق، والمباني المكتبية، والمدارس، ومحطات القدرة للمَرافق العمومية، ومحطات المطارات الطرفية. وخلايا وقود حمض الفوسفوريك تولد الكهرباء بكفاءة أعلى من 40 في المئة - وتقريباً 85 في المئة إذا كان البخار الذي تنتجه هذه الأنواع المحددة من خلايا الوقود يُستخدم للتوليد المشترك ـ مقارنة بـ 30 في المئة لمحركات الاحتراق الداخلي الفاعالة جداً. ودرجات حرارة التشغيل هي في حدود 204 ^{o}C. ويمكن استخدام خلايا الوقود

هذه في السيارات الكبيرة أيضاً، مثل الحافلات والقاطرات.

4-3-2-2 غشاء تبادل البروتون

خلايا وقود غشاء تبادل البروتون (Proton Exchange Membrane (PEM)) يمكن أن تعمل عند درجات حرارة منخفضة نسبياً (حوالى 93 °C)، ولها كثافة قدرة عالية، ويمكن أن تغيّر نتاجها بشكل سريع لتلبي التغيرات في طلب القدرة، وملائمة لتطبيقات مثل السيارات حيث يتطلب بدء التشغيل السريع للمحرك. ووفقاً لوزارة الطاقة الأميركية، «فإنها المرشح الأول لسيارات الأعمال الخفيفة، وللمباني، وبشكل كبير للتطبيقات الصغيرة جداً مثل استعمالها كبدائل للبطاريات القابلة لإعادة الشحن في كاميرات الفيديو».

4-3-2-3 الكربونات المنصهرة

تَعِد خلايا وقود الكربونات المنصهرة بكفاءات عالية لتحويل الوقود ـ إلى ـ كهرباء وإمكانية استهلاك الوقود التي أساسها الفحم الحجري. وتعمل هذه الخلية عند درجات حرارة حوالى 649 °C. وقد تم اختبار الأكوام الأولى من الكربونات المنصهرة بالحجم الكامل، كما قد تم تجهيز وحدات الإيضاح للاختبار في كاليفورنيا في عام 1996.

4-3-2-4 الأكسيد الصلب

إحدى خلايا الوقود الأخرى الواعدة جداً، وهي خلية وقود الأكسيد الصلب، يمكن استخدامها في التطبيقات الكبرى ذات القدرة العالية، بما في ذلك محطات توليد الكهرباء المركزية الكبرى والصناعية. وترى بعض شركات التطوير أيضاً استخدام خلية وقود الأكسيد الصلب في محركات السيارات. وقد تم تجهيز اختبار 100

kW في أوروبا. وهناك وحدتان صغيرتان، 25 kW، قد بدأت بالعمل في اليابان. ويستخدم نظام الأكسيد الصلب عادة مادة سيراميك صلبة بدلاً من الإلكتروليت السائل، ما يسمح لدرجات حرارة التشغيل بالوصول إلى 1000 °C. وكفاءات توليد القدرة يمكن أن تصل إلى 60 في المئة. وأحد أنواع خلايا وقود الأكسيد الصلب يستخدم ترتيباً من أنابيب بطول متر واحد. والأنواع الأخرى تحتوي على قرص مضغوط يشبه الجزء العلوي من علب الحساء.

4-3-2-5 القلوية

بعد الاستخدام الطويل في المهمات الفضائية، يمكن للخلايا القلوية أن تحقق كفاءات تصل إلى حد 70 في المئة. وتستخدم هذه الخلايا هيدروكسيد البوتاسيوم القلوي كإلكتروليت. وحتى الوقت الحاضر، كانت هذه الخلايا مكلفة جداً للتطبيقات التجارية، إلاّ أن العديد من الشركات تبحث عن طرق لخفض التكاليف وتحسّن من مرونة التشغيل.

4-3-2-6 خلايا الوقود الأخرى

تُعتبر خلايا وقود الميثانول المباشر (DMFC) نسبياً أعضاء جدداً من عائلة خلية الوقود. وهذه الخلايا تشبه خلايا غشاء تبادل البروتون (PEM) من حيث إن كِليهما يستخدم غشاء بوليمر كإلكتروليت. لكن، في خلايا وقود الميثانول المباشر، تقوم مادة الأنود الحفازة نفسها بسحب الهيدروجين من الميثانول السائل، متجاهلة الحاجة إلى أداة إعادة تشكيل الوقود. ويتوقع الحصول على كفاءات تصل إلى 40 في المئة من هذا النوع من خلايا الوقود، الذي يعمل عادة عند درجات حرارة بين 48.9 °C و 87.8 °C. ويتم تحقيق كفاءات أعلى عند درجات الحرارة الأعلى.

4-3-2-7 خلايا الوقود المُجدَّدة

كونها عضواً يافعاً جداً من عائلة خلية الوقود، فإن خلية الوقود المُجدَّدة يمكن أن تكون جذابة كشكل حلقة مغلقة لتوليد القدرة. يتم فصل الماء إلى هيدروجين وأكسجين بواسطة جهاز تحليل كهربائي يعمل بالطاقة الشمسية. ويتم تغذية الهيدروجين والأكسجين في خلية الوقود التي تولد الكهرباء، والحرارة، والماء. يتم إعادة تدوير الماء مرة أخرى إلى جهاز التحليل الكهربائي العامل بالطاقة الشمسية وتبدأ العملية مرة ثانية.

الفصل الخامس

الأنظمة الفولتضوئية في المناطق المدارية

بالرغم من أن معظم سعة الفولتضوئية هذه الأيام يتم تنصيبها مرتبطة بالشبكة في المناخات المعتدلة نتيجة القوانين المناسبة في بعض البلدان، إلاّ أن الأسواق الكبرى «الطبيعية» للفولتضوئي هي التطبيقات غير المتصلة بالشبكة ضمن «الحزام الشمسي» المداري على طول خط الاستواء. والمخطط الأساسي لنظام فولتضوئي نموذجي للتطبيقات غير المتصلة بالشبكة (يؤدي الربط الشبكي دوراً بسيطاً في المناطق المدارية، فمعظم الأنظمة تُستخدم لإيصال الكهرباء إلى الريف) بسيط نسبياً: مولد فولتضوئي يتكون من عدد من المنظومات الفولتضوئية، وجهاز تخزين للطاقة (عادة بطارية حمض الرصاص)، وأجهزة تكييف الطاقة (تتكون من منظم الشحن، وبشكل اختياري، عاكس كهربائي). وإجمالاً، فقد تم تنصيب حوالى مليون من مثل هذه الأنظمة حول العالم. وبالرغم من ذلك، عملياً، فقد تم الإبلاغ عن حالات أعطال؛ ومعظمها ليست تقنية بطبيعتها. استناداً إلى عشر سنوات من الخبرة العملية في البرازيل، يسلِّط هذا الفصل الضوء على بعض الاعتبارات والأمثلة المهمة لأفضل الممارسات لكيفية تنفيذ مزوِّد طاقة فولتضوئي كفوء وفاعل، ويدوم طويلاً، ومربح تجارياً. وبعض التوصيات المطروحة قد تبدو بديهية، لكن يبدو أنها لم تؤخذ في الاعتبار في العديد من مخططات وعمليات التنصيب في الماضي، حتى على مستوى البرامج الكبيرة لإيصال الكهرباء إلى الريف.

5-1 أمور ما قبل التنصيب

5-1-1 الاعتبارات الإضافية للتخطيط

5-1-1-1 إيجاد متطلبات الحِمل

مع أن سعر تنصيب النظام الفولتضوئي يزداد بشكل مباشر تقريباً مع استهلاك الكهرباء، يميل المستهلكون إلى التقليل من تقدير أحمال النظام في أثناء مرحلة التخطيط من أجل توفير التكاليف، ما يؤدي بالتالي إلى تنصيب نظام دون الحجم المطلوب ويحتوي على عيوب. وأفضل طريقة هي قياس استهلاك القدرة والطاقة على مدى فترة من الزمن. ويبيّن تحليل للاستهلاك في الغالب أنه من الأرخص كثيراً استبدال الأجهزة القديمة التي لها استهلاك عالٍ للطاقة (مثلاً، مصابيح الإنارة، الثلاجات، المجمدات. . . إلخ) بأجهزة جديدة ذات طاقة فاعلة بدلاً من قياس حجم المولِّد الفولتضوئي والبطاريات وفقاً لمتطلبات الطاقة للأجهزة القديمة.

5-1-1-2 آلية تطور المشروع مقابل القيود الزمنية

بدءاً من تحديد المشروع، والتخطيط، والتمويل، والطلب، والشحن إلى التنصيب «الجاهز» للنظام، فإن الزمن المستغرق قد يصل إلى سنوات (آخذين في الاعتبار بيروقراطية تشريع المشروع، وفرض رسوم الاستيراد، وتحرير الأجهزة). والاستيراد غالباً ما يستغرق وقتاً طويلاً، ولهذا يجب استخدام خدمات خارجية مكلِفة عن طريق ما يسمى «إرساليات». وقد تم الإبلاغ عن أوقات انتظار من سنة إلى سنة ونصف، وبالتالي فإن البضاعة قد تتجرد من تغليفها والأدوات ربما «تختفي».

وخلال تلك الإجراءات كلها، فإن ظروفاً جانبية للمشروع ربما تكون قد تغيرت: قد ينتقل الأشخاص الذين تم تخصيص محطة

الطاقة لهم، أو قد يتم تركيب خطوط الشبكة الكهربائية، أو قد يتم شراء أجهزة توليد تعمل بالديزل؛ أو حتى أن الموقع المخطط للتنصيب ربما يكون قد تضرر بفيضان، أو تم تحويله إلى موقع للنفايات. فالتخطيط الواضح والدقيق من بداية المشروع إلى الوصول إلى نظام تزويد طاقة جاهز نادراً ما يتحقق، وغالباً ما يحتاج التصميم إلى إعادة تقويم وتعديلات مهمة. ولإنجاز ذلك، فإن الاستعداد الدائم، والمراقبة، والتحكم هي أشياء ضرورية.

5-1-2 التمويل

تبنّي برامج دعم للمشروع يعتبر مهماً إلاّ أنه إجراء يتطلب الكثير من الوقت. وفي الغالب، هناك الكثير من القيود التي تحصر مثل هذه المساعدات مثل: الفترات الزمنية المحدَّدة للتنصيب، والاستخدام الإلزامي للأدوات الوطنية (البطاريات، مثلاً)، والتعاون مع الشركات المحلية والمَرافق العمومية، وضمانات إيصال الطاقة إلى مدى طويل، والحصول على مصادقة من قبل السلطات المحلية، والمنافسة الصعبة على المناقصات. وحيث إن التعويض يقدَّم بالعملة المحلية وتُطبّق معدلات الفائدة، فإن المخاطر المصاحبة يجب أخذها في الحسابات، مثل تقلب سعر الصرف. الإنتاج والتجميع المحلي للمكوِّنات يمكن أن يقلل من هذه المخاطر، لأن المرتبات، ورسوم التأجير، والمواد الخام تُدفع بالعملة المحلية؛ ولمعظم الحالات فإن هذا الإجراء سيُجنِّب ضرائب الاستيراد العالية.

5-1-3 الاستيراد

استيراد الأدوات والمواد أمر صعب ويستغرق وقتاً طويلاً: لحماية بعض الصناعات المحلية من المنتجات الرخيصة المستوردة فإن الضرائب قد تكون عالية ويمكن أن يكون لها تأثير كبير في

الميزانية (ضرائب الاستيراد قد تُضاعِف أسعار بعض السلع، وبشكل أساسي الإلكترونيات). وبمعرفة حقيقة أن هذه القوانين ليست داعمة اقتصادياً ومن المحتمل أن تعيق من اقتصاد البلاد على المدى البعيد، فإن السلطات تستثني كثيراً السلع ذات الفائدة الاستراتيجية ـ مثل تقنية الطاقة المتجددة ـ من النظام الضريبي العالي، إلاّ أن هذا يحتاج إلى معرفة وإلى إجراءات رسمية، كما إن السلع المصرحة يجب أن تطابق تماماً الأصناف المعفية.

توصيات: تأكد من أن جميع مكونات نظامك قد تم وصفها بشكل جيد (باللغة المحلية!). وبالإضافة إلى السجلات المفصلة للأدوات، يجب أيضاً توثيق خلفية عن الشركات المشاركة في المشروع بدقة (مثلاً، شهادة تأسيس الشركة، وإثباتات القدرة الفنية والمالية). ووحدات القياس المذكورة في الوثائق (لكل قطعة، لكل حجم، لكل كيلوغرام، والمقاييس المحلية/ البريطانية/ الأميركية) هي أمر مهم، وأيضاً العملات وأسعار صرفها وأيٌّ منها سُيستعمل (مثلاً، البرازيل لها ستة أسعار صرف رسمية مختلفة للريال البرازيلي مقابل الدولار الأميركي). وفي بعض الأحيان، يجب تقسيم قطع الأجهزة إلى مكونات ثانوية: الإلكترونيات عامة، ووحدات المعالجة، والذاكرات، والمحولات، والتوصيلات الطرفية، والأدوات، وشاشات العرض، ووحدات النظام الفولتضوئي، غالباً برسوم مختلفة للاستيراد الضريبي، كما يجب تعبئة وتصديق نماذج منفصلة. وفي أغلب الأحيان، لا تُفرض ضريبة الاستيراد على قيمة البضاعة المستوردة فقط، بل على النفقات الإجمالية، بما في ذلك تكاليف الشحن.

5-1-4 حواجز اللغة

5-1-4-1 خلال مراحل الإجراءات الروتينية

تتطلب تطبيقات الاعتماد والدعم المالي، ونماذج الاستيراد والمصادقة معرفة عميقة باللغة المحلية. وبصفة خاصة فإن التعبيرات الفنية والقانونية قد تزيد من الصعوبات. والمصطلح يمكن أن يختلف تماماً ضمن اللغة نفسها (مثلاً، اللغة البرتغالية من البرتغال مقابل البرتغالية البرازيلية أو الإنجليزية البريطانية/ الأميركية/ الهندية/ الأفريقية). والسلطات والمسؤولون حساسون جداً في أغلب الأحيان بشأن الاستعمال «الصحيح» لمصطلحاتهم وفي ما يتعلق بمراكزهم الوظيفية. فقد يقومون بتأخير الإجراءات بشكل متعمد إذا أحسّوا بالانتهاك. ومن جهة أخرى، فهم لا يتضايقون إذا سألتهم بشكل متكرر (بأسلوب ودّي) عن الوضع الفعلي للمشروع (وهي حالة عادة ما يتضايق منها المسؤولون الأوروبيون). وأفضل استراتيجية هي «إشراك» المسؤولين في مشروعك، أيْ اشرح لهم مدى أهمية المشروع لبلدهم، بحيث يشعرون بفخر كونهم جزءاً منه.

5-1-4-2 في موقع التنصيب

بالإضافة إلى الحواجز العامة للغة، فإن الأفراد القاطنين في مناطق بعيدة ليسوا ملمّين في الغالب بالتعبيرات التقنية الأساسية. فالتدريب التفاعلي ضروري، حتى وإن كان يستغرق وقتاً طويلاً. واستخدام مواد تدريب مجهزة بشكل واضح تماماً هو أمر مهم جداً. فالأميّة منتشرة بشكل واسع (غالباً ما تشير إلى ذلك إحصائيات أكثر من دولة)، وبخاصة في المناطق البعيدة حيث يكون الأطفال مطلوبين للعمل. ولا يمكنك أن تتوقع بأن تقابل أشخاصاً يتحدثون لغة أجنبية في الموقع.

5-2 الأمور التقنية

5-2-1 التركيب

تتطلب الظروف البيئية القاسية مثل درجات الحرارة المرتفعة، والرطوبة العالية، والإشعاعية العالية، والرياح الشديدة (في المواقع القريبة من البحر والمرتبطة بجو مالح)، والوصول الصعب للترميم استخدام أفضل المواد المتوافرة الموجودة. وفي أغلب الأحيان، لا تتوافر المكونات المصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ محلياً ويجب استيرادها.

5-2-1-1 تثبيت المنظومات الفولتضوئية

يفضل تركيب وتثبيت المنظومات الفولتضوئية من خلال استعمال مسامير البرشام (Rivets) بدلاً من المسامير اللولبية لتفادي التركيب غير المربوط بإحكام ومنع سرقة المنظومات. أضف إلى ذلك، فإن المسامير اللولبية الفولاذية المقاومة للصدأ قد يصعب الحصول عليها، وقد تكون أيضاً معرضة للسرقة (انظر أدناه).

5-2-1-2 توصيل أسلاك المولد الفولتضوئي

لا يعمل المشتغلون المحليون بالكهرباء بشكل عام بتوصيل أسلاك التيار المباشر العالي والجهد المنخفض (إضافة إلى كهرباء السيارات)، ولهذا من الصعب الحصول على كابلات مرنة مقاومة للأشعة فوق البنفسجية بقُطر ولونٍ مناسبَين. وهذا نفسه ينطبق على المفاتيح، والمنصهرات، والتوصيلات الطرفية أيضاً. وغالباً، هذه القطع غير متوافرة محلياً ويجب استيرادها.

5-2-1-3 منع السرقة

تعتبر السرقة المتزايدة للألواح الفولتضوئية قضية خطيرة في

المواقع المدارية، وبخاصة في أفريقيا. وقد قررت شركة اتصالات جنوب أفريقيا (South African Telecom) بشكل استثنائي شراء منظومات فولتضوئية برتقالية اللون لسهولة التعرف إلى الألواح الفولتضوئية المسروقة. ويمكن تركيب المكونات بواسطة مسامير البرشام بدلاً من المسامير اللولبية لجعل السرقة أكثر صعوبة (انظر أعلاه). وغالباً، حتى الأجزاء الصغيرة مثل الأدوات، والتوصيلات الطرفية، والمآخذ، والكابلات، أو حتى صنابير المياه معرضة للسرقة، لأنها بالنسبة إلى الفقراء تعتبر أشياء قيّمة جداً. يساعد تهيئة المجتمع على النظام وترشيح شخص محلي مسؤول على النظام، كثيراً على تفادي هذا الأمر.

5-2-1-4 اعتبارات السلامة

بالإضافة إلى التنصيب الآمن مع عزل النقاط الطرفية وأسلاك التوصيل، يجب تخزين البطاريات أيضاً في موقع آمن بعيداً من منطقة الإقامة. والأجسام المعدنية الموضوعة على أطراف التوصيل للبطارية قد تسفر عن حوادث صارمة.

5-2-2 التشغيل بغير نقطة القدرة القصوى للمولد الفولتضوئي

نتيجة إلى الخصائص *I-V* النموذجية للخلايا الشمسية والمنظومات الفولتضوئية، يقل نتاج الطاقة الكهربائية بشكل خطي تقريباً عندما يتقابل منحنى الحِمل مع منحنى *I-V* للمولد الفولتضوئي في الجانب «الأيسر» من نقطة القدرة القصوى (Maximum Power Point (MPP))، نحو جهود التشغيل الأقل. ومن ناحية أخرى، فإن القدرة تنخفض أُسّياً عندما يتقاطع منحنى الحِمل مع منحنى I-V للمولد الفولتضوئي في الجانب «الأيمن» من نقطة القدرة القصوى، نحو جهود التشغيل الأعلى. ويحدث هذا السلوك الأخير عندما

ينخفض جهد المولد (مثلاً، لدرجات حرارة التشغيل الأعلى في الخلايا الشمسية السليكونية أحادية البلورة ومتعددة البلورة، التي تتميز عادة بمعامل جهد كهربي ـ درجة حرارة مقداره K /0.4%- إلى K/ 0.5%).

لهذا، يوصى إما شراء منظومات فولتضوئية تحتوي على عدد كبير من الخلايا الشمسية متصلة على التوالي لرفع مستوى جهد المولِّد، أو الحصول على أجهزة تحكُّم الشحن بمحول رفع مُدمج DC-DC مع متعقب نقطة القدرة القصوى لتمكين البطارية من الشحن الكامل حتى عندما تنخفض مستويات جهد المولد. لسوء الحظ، لا توفّر الصناعة مثل هذا التجهيز كمُنتج معياري.

5-2-3 تخزين الطاقة

5-2-3-1 أنواع البطاريات

بالرغم من أن هناك العديد من أنواع البطاريات المختلفة المتاحة، إلاّ أن بطاريات حمض الرصاص تقدم معدل التكلفة الربحية الأفضل. ويتم توفير بطاريات حمض الرصاص بثلاث مواصفات: تقليدية («مفتوحة» ـ تسمح بتعويض الماء المفقود)، و«خالية من الصيانة» (فائض من الإلكتروليت، وإطلاق منخفض للغاز)، و«هلامية مصمتة» (إلكتروليت ممتص). وحيث إن أعمال الصيانة غالباً ما تكون رديئة، أو أن تعويض الماء يتم بماء ملوث، فإن البطاريات الخالية من الصيانة هي المفضلة. والبطاريات المصمتة بالكامل هي أقل قوة وأظهرت عمراً زمنياً أقصر مقارنة بالبطاريات الخالية من الصيانة في المناخ الدافئ، وبخاصة عندما لا يُجرى تحكُّم الشحن بشكل ملائم.

5-2-3-2 مستوى الجهد الاسمي

في معظم البلدان المدارية يتم اشتقاق البطاريات الشمسية من بطاريات السيارات أو الشاحنات، وبالتالي تتوفر فقط أحجام بجهد 12 V. السعة التخزينية القصوى التي يمكن إيجادها في البرازيل هي 220 Ah، وبالتالي يجب توصيل البطاريات على التوازي لتحقيق سعة تخزينية أكبر عند الجهد المعطى. ونتيجة التجاوزات المسموح بها في عملية إنتاج البطاريات (مثلاً، في معالجة اللوح القطبي الكهربائي أو في تركيز حمض البطارية)، فإنه من المرجح أن يحدث تغيُّر في الخصائص الكهربية مثل المقاومة الداخلية. في هذه الحالة، ستعاني البطارية المتصلة على التوازي من تيارات داخلية كبيرة تؤدي إلى سعة تخزينية مخفضة وعمر زمني قصير لمجموعة البطاريات. وقد عانينا من فروق كبيرة في الجهد حتى في البطارية الأغلى ثمناً ذات السعة العالية. هذا التأثير قد يحدث نتيجة عملية التصنيع الرديء والافتقار إلى التحكُّم في الجودة، من المحتمل بسبب العدد المنخفض لإنتاج بطاريات عالية السعة. وعادة، من الصعب عمل إجراءات الفحص في موقع التنصيب. والبطاريات قد تُوجِد مشاكل أيضاً نتيجة ظروف التخزين غير المتجانسة: التعرض لدرجات الحرارة العالية (مثلاً، بسبب التعرض لأشعة الشمس) يؤدي إلى تيارات إضافية داخلية وإلى تلف.

لأن ضرائب الاستيراد المفروضة على البطاريات في الغالب عالية بشكل تحريمي، فإن الحل الوحيد لمعظم الحالات هو استخدام منتجات وطنية بمستويات جهد عالية ـ وبالتالي التخلص من الحاجة إلى توصيل البطاريات على التوازي. باستخدام بطارية 12 V، 220 Ah بأقصى عمق تفريغ 50 في المئة، فإن مستوى الجهد يجب زيادته بمقدار 12 V إضافية لكل 1.3 kWh من مستويات التخزين. وللجهود الأعلى من 50 V، يجب اتخاذ إجراءات أمان إضافية.

ويجب استبدال بطاريات حمض الرصاص التقليدية حوالى أربع مرات خلال العمر الزمني للنظام الفولتضوئي. وللاحتفاظ بالنظام فاعلاً، يجب تبنِّي استراتيجية استبدال للحصول على الدعم المالي جاهزاً لشراء بطارية جديدة واستخدام الأيدي العاملة لتغييرها. بعض شركات التجديد تقوم بشراء البطاريات القديمة مقابل مبالغ بسيطة، إلاّ أن هذه الشركات لسوء الحظ تقع بعيداً عن معظم المشاريع في المدن الكبيرة، كما إنها متخصصة ببطاريات السيارات.

5-2-4 أدوات تكييف القدرة الكهربائية

بالرغم من أنه في الدول المتطورة معظم الأدوات الكهربائية المستخدمة كحِمل تتميز بفرق في الطور بين 0.9 و1، إلاّ أن الأدوات المحلية قد تتميز بفرق في الطور كحد أدنى 0.6، وبهذا فإن العاكسات يجب أن تكون قادرة على العمل مع مثل هذه الأحمال الحثية. علاوة على ذلك، فإن الفقد بسبب الاحتكاك يميل إلى أن يكون أعلى بحيث يزيد من تيارات بدء التشغيل للعاكس.

5-2-4-1 أجهزة عكس التيار

معظم العاكسات يتم تشغيلها بواسطة ترانزستورات القدرة MOSFET. وحيث إنه من ناحية فإن الترانزستورات MOSFET يمكن توصيلها بسهولة على التوازي بسبب معامل درجة الحرارة الموجب لمقاومة بدء التشغيل لها، إلاّ أنه من ناحية أخرى فإن هذا يمكن أن يؤدي إلى حلقة مفرغة عندما يعمل الجهاز عند درجات الحرارة المرتفعة: درجات الحرارة المرتفعة تزيد من مقاومة بدء التشغيل الداخلية وتؤدي إلى تبدد إضافي أكثر للحرارة والذي سيقوم برفع حرارة ترانزستورات MOSFET الأخرى المتصلة على التوازي والمركبة على الجهاز المبدد للحرارة نفسه.

5-2-4-2 التهوية

تستخدم معظم العاكسات الكهربائية تهوية قسرية بواسطة المراوح المتحكِّمة بدرجة الحرارة. في أغلب الأحيان، المراوح التي يتم تركيبها بحسب الطلب لا تتمكن من البدء بالعمل بسبب تراكم أوراق الأشجار أو بقايا الحشرات فيها. لتفادي ذلك، يوصى التشغيل في الوضع «بارد» باستخدام أجهزة عكس زائدة الحجم (تتميز بتيارات عكسية عالية ومقاومات بدء تشغيل منخفضة) تحتاج إلى تهوية طبيعية فقط. ويجب الأخذ بعين الاعتبار أيضاً بأن درجة حرارة الجو المحيط يمكن أن تصل بسهولة إلى 60 °C في الحاوي، وبالتالي فإن المخطط الحراري يجب إعداده لدرجات حرارة تشغيل 70 °C وأعلى. وعادة، درجة حرارة التشغيل القصوى لأدوات تكييف القدرة هي 55 °C، ما تؤدي إلى تقصير العمر الزمني وأعطال (مثلاً، انتفاخ المكثف، وانحطاط العرض، وذوبان التوصيلات الطرفية، وفي النهاية قصر دائرة).

5-2-4-3 أجهزة تحكُّم الشحن

أجهزة تحكُّم الشحن غير المرتبطة بدرجة الحرارة قد تتسبب بإطلاق فائض للغاز عند درجات حرارة التشغيل العالية. وهذا يؤدي إلى نقص الإلكتروليت الذي يجب تعويضه. إلاّ أن هذا لا يحدث في البطاريات «الخالية من الصيانة» والمصمتة، وبالتالي فإن السعة والعمر الزمني سينخفضان.

5-3 التشغيل والصيانة

5-3-1 تلوث وانحطاط مكونات النظام

حيث إن مختلف أنواع النباتات والحيوانات منتشرة كثيراً في

المواقع المدارية، فإنه من المرجح جداً أنها ستؤثر في مكونات النظام الفولتضوئي الواقع في المناطق البعيدة: ذرق الطيور، والبذور، وغبار الطلع، وأوراق وفروع الأشجار، والغبار، وبقع الأوساخ قد تتراكم على اللوح الفولتضوئي وتؤدي إلى فقد كبير في الأداء. وعادة، الخلايا الشمسية في داخل المنظومة الفولتضوئية متصلة على التوالي، وبالتالي فإن الخلية المظللة بشكل أكبر هي التي تسيطر على التيار الخارج للدائرة. وإذا لم يتم استعمال دايودات الإمرار الجزئي بشكل ملائم، قد يحدث تلف دائم للخلايا بواسطة «البقع الساخنة». وتأثير التنظيف الذاتي يتطلب زاوية ميلان ملائمة للوح، لكن في المواقع المدارية يتم تركيب اللوح أفقياً تقريباً لالتقاط أقصى إشعاعية، ما يؤدي إلى منع التنظيف الذاتي إلى حد كبير. وفي الحجرة التي يتم فيها حفظ البطاريات وأدوات تكييف القدرة، فإن الطيور، والفئران، والجرذان، والثعابين، والعناكب، والصراصير، والنمل الأبيض، والعقارب، والضفادع، والسحالي، والخفافيش قد تجد مسكناً لها وتقوم أيضاً بتخريب الكابلات، والتوصيلات الطرفية، والمرحِّلات (Relays) خلال فترة قصيرة من الزمن (الشكل (5-1)). والتأثيرات النفسية أيضاً يجب أخذها في الاعتبار: إذا كان الموقع قذراً ويصدر رائحة كريهة فإن مهام الصيانة ستكون منفرة ولن يتم إجراؤها.

توصيات: من ناحية، فإن الحجرة التي يتم فيها حفظ البطاريات وأدوات تكييف القدرة يجب أن توفر تهوية جيدة لإبقاء درجات الحرارة عند المستوى المقبول والسماح بخروج الغازات الصادرة عن البطاريات، ومن ناحية أخرى يجب منع تسلل الحشرات والحيوانات (مثلاً باستخدام شباك صلبة). حافظ عليها دائماً نظيفة ومرتبة.

5-3-2 المراقبة

قد يواجه العاملون المحليون صعوبات في تحديد ووصف حالة النظام (أو يخافون عمل ذلك)، كما إنهم قادرون بالكاد على تنفيذ الأعمال الملائمة. لذلك، فإن تدريب وبناء المقدرة للعاملين المحليين هو أمر ضروري. علاوة على ذلك، يجب تجهيز أدوات ملائمة سهلة القراءة، ومفاتيح حماية معقولة من الأعطال سهلة التوضيح بمؤشر ضوئي و/أو صوتي ـ ومن الأفضل أن تكون ضمن مخطط تدفق النظام - بالإضافة إلى إمداد طويل المدى لقطع الغيار والأدوات الملائمة. كما يجب ترشيح وتأجير شخص محلي يكون مسؤولاً عن المحطة؛ وهذا الإجراء أيضاً يمنع السرقة والتخريب المتعمد للنظام (انظر أعلاه). واستخدام نظام مراقبة عن بعد (بواسطة خط هاتف خلوي أو بواسطة قمر صناعي) يمكن أن يكون مساعداً جداً للتعرف إلى المشاكل، أو لبدء الصيانة الوقائية.

5-3-3 توصيات إضافية

كل تنفيذ ناجح يعتبر مكسباً عظيماً أفضل من الكثير من الإعلانات والعبارات العديدة. وبالأخذ بعين الاعتبار التوصيات المقدمة، فإن الفرص سانحة جداً لتنفيذ مشروع فاعل؛ ولإبقائه فاعلاً، حافظ على نشاط الشخص المسؤول عن المشروع من خلال تزويده بالوثائق وقطع الغيار الكافية، والراتب المناسب، والتواصل المستمر معه. والزيارات المتكررة تضمن بقاء النظام في حالة جيدة. وحتى ولو كان معدل التكلفة إلى الربحية لمشروعك يتناقص، حافظ على بقاء النظام فاعلاً: اعتبره مشروعاً إيضاحياً يمثل نموذجاً إيجابياً. ومن المرجح جداً ظهور عملاء جدد محتملين على شكل زوار للمحطة. وقد تظهر مشاريع جديدة فقط من خلال ملاحظة البيئة

بعناية. وفي أغلب الأحيان، تبدو الحلول واضحة، إلاّ أنه لا يتم تنفيذها (انظر الشكل (5 ـ 1)).

5-4 ملاحظات ختامية عن الفولتضوئية في المناطق المدارية

بالرغم من أن الظروف أساساً مواتية جداً لتنفيذ مشروع فولتضوئية في المناطق المدارية، مثل الإشعاعية العالية بتغير موسمي منخفض وضرورة توصيل الكهرباء إلى الريف، إلاّ أنه يجب التغلب على العديد من العقبات. وبالأخذ في الاعتبار التوصية المقدمة أعلاه، فإن الفرص سانحة جداً لتنفيذ مشروع ناجح. ومع أن كل جزء في المشروع قد لا يمكن تحليله إلى تفاصيله الكاملة، إلاّ أن القدرات الإضافية للارتجال، والإصرار، واللطف، وروح الدعابة الجيدة تعتبر ضرورية لتنفيذ مشاريع فولتضوئية في المناطق المدارية.



الشكل (5-1): مولّد يعمل بالديزل لتزويد محطة تقوية هاتف خلوي 2 kW مع ضوضاء وغازات عادم في ساحة فندق بمدينة كانكون في المكسيك. ويجب حضور عامل التشغيل كل 12 ساعة لأعمال إعادة التعبئة – فلماذا لا يُستخدم مولّد فولتضوئي بدلاً عن ذلك؟

الفصل السادس

استهلاك الطاقة لبناء محطة طاقة فولتضوئية

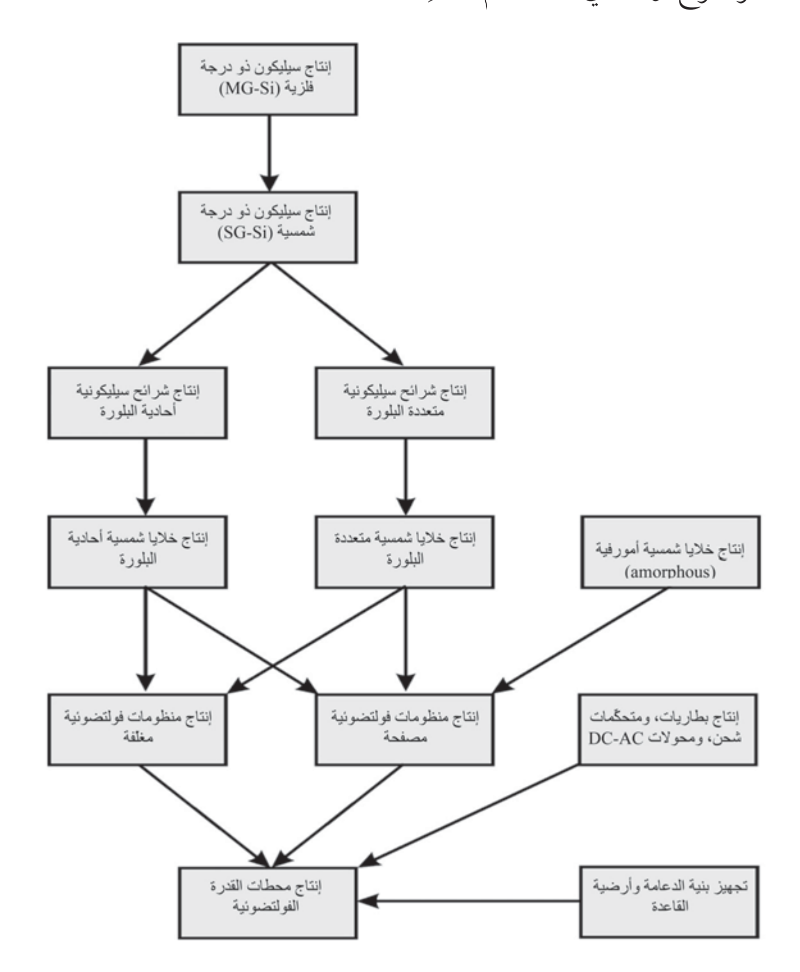
يشمل «إنفاق الطاقة المتراكِمة» (Cumulated Energy Expense (CEE)) لنظام إمداد الطاقة المادة وتدفقات الطاقة المطلوبة في أثناء التصنيع (CEE_M)، والتشغيل (CEE_O)، وإعادة التدوير (CEE_R). يناقش هذا الفصل إنفاق الطاقة لصناعة محطة طاقة فولتضوئية (انظر الشكل (6-1))، شاملاً التعدين، والمعالجة، وإنتاج المواد للتشغيل والإمداد، بما في ذلك النقل.

6-1 ملاحظات تمهيدية

في أغلب الأحيان، تستند المراجع العلمية إلى بيانات مسجلة عندما لم يتم استخدام منشآت الإنتاج للشركات المصنِّعة بشكل كامل للإنتاج (50 ـ 70 في المئة)، مثلاً بسبب تشبُّع السوق من عام 1995 إلى عام 1999. وبالرغم من أن استهلاك الطاقة للعديد من العمليات يتم إيجاده بواسطة حِمل قاعدي كبير، والقليل نسبياً من العمليات تعتمد مباشرة على كمية التصنيع، إلاّ أن الاستهلاك المحدد الملاحظ للطاقة أعلى بكثير من ذلك لظروف السعة الكاملة (انظر أيضاً (Hagedorn 1989).

من أجل حساب هذه العوامل، تم الأخذ في الاعتبار ثلاثة نماذج حالات مختلفة. وكل جزء على حدة من استهلاك الطاقة

المتراكِمة لمحطات الطاقة الفولتضوئية (*CEC*) أُشير إليه بالمتغير W للوضوح ولتفادي استخدام معامِلات متعددة.



الشكل (6-1): الخطوات المهمة لإنتاج محطات القدرة الفولتضوئية (من دون استنفاذ المادة الخام) المتعلقة بإنفاق طاقة التصنيع باستخدام تقنيات إنتاج مختلفة.

6-1-1 التمييز بين نماذج الحالة

يشير نموذج الحالة الأول إلى معايير تقنية الإنتاج الحالية والعاملة لنوبة واحدة (8 ساعات) باستفادة كاملة، مع نتاج $2\ MW_p/a$ للخلايا والمنظومات. ونموذج الحالة الثاني يختبر التحسينات التقنية في الإنتاج، إضافة إلى التوسع إلى أربعة نوبات تشغيل، مؤدياً إلى سعة إنتاجية $25\ MW_p/a$.

6-1-2 الاستهلاك المكافئ للطاقة الأساسية

لحساب استهلاك الطاقة الأساسية المتراكِمة، يجب تحويل قيم استهلاك الطاقة للإنتاج إلى القيم المكافئة للطاقة الأساسية. للطاقة الكهربائية تم استخدام درجة استفادة 0.4 (كفاءة الطاقة الأساسية)، وللوقود السائلة والغازية كانت هذه القيمة 0.85، وللاستهلاك اللاطاقي كانت 0.8. عوامل التحويل هذه مأخوذة من بنية إمداد الطاقة في ألمانيا وتمثل الحد المحافظ (الأدنى) للقيم المعروفة. إضافة إلى ذلك، فقد تم لأول مرة اختبار تأثير إزاحة المواقع لإنتاج وتطبيق الطاقة الفولتضوئية. ويمكن تطبيق هذه النتائج لإنتاج توليد الطاقة الداخلية أيضاً مثل الأنظمة الحرارية الشمسية، أو مولدات الرياح، أو الأنظمة الفولتضوئية، أو مولد الديزل باسترداد حراري.

6-2 تجهيز المواد الخام للإنتاج

تتطلب المواد الخام اللازمة للإنتاج إنفاقاً معيّناً لبدء وتطوير مكمن الرِكاز (المعدن الخام) (W_{res})، بالإضافة إلى تحرير واستغلال المواد الخام مباشرة (W_{free}). ويجب نقل المعدات إلى موقع المعالجة (W_{trans}). كما إن المعالجة الإضافية للمواد لكي تكون مطابقة لمعايير التشغيل تتطلب طاقة إضافية (W_{prep}). ومجموع ذلك

كله هو مشاركة استهلاك وانبعاث الطاقة قبل الإنتاج الملائم لنظام الطاقة الفولتضوئية الفعلي ($W_{pre\ pro}$).

$$W_{pre\ pro} = \sum W_{res} + \sum W_{free} + \sum W_{trans} + \sum W_{prep} \quad (7)$$

6-2-1 تطوير المكمن

اعتماداً على نوع حامل الطاقة أو المادة الخام والظروف المحلية، فإن نفقات تطوير المكمن يمكن أن تكون كبيرة. على سبيل المثال، لاستغلال النفط فإن كلاً من التنقيب والمثاقب المجسية تعتبر ضرورية ($W_{prospect}$). وفي أغلب الأحيان، عند كل خمسين حَفْر فقط يكون التنقيب ناجحاً. ويتطلب أيضاً نقل المعدات (W_{trans}) (البرج، والأنابيب، والأدوات)، كما يجب أن تؤخذ في الحسابات إقامة بنية تحتية ($W_{infrastr}$) عند المكمن (طرقات، وسكة حديدية، وخطوط أنابيب، وتسكين، ومطارات). ويتطلب التعدين تحت الأرض تثبيت عمود (W_{prep}). ولتعدين الحفرة المفتوحة، من الضروري أحياناً إزاحة القرى. أخيراً، وليس آخرَ، بعد استنفاد المكمن، يجب تنظيف الموقع وإعادته إلى حالته الأصلية ($W_{recycle}$).

$$W_{res} = \sum W_{prospect} + \sum W_{infrastr} + \sum W_{trans} + \sum W_{prep} + \sum W_{recycle} \quad (8)$$

6-2-2 تحرير واستغلال المواد الخام

يجب تحرير المواد الخام من الرِكازات وفصلها ($W_{separate}$). وتعتمد التقنية المستخدمة على كثافة المادة ووفرتها. للمواد الخام الصلبة، يمكن إجراء العملية ميكانيكياً (باستخدام مطارق أو حفّارات) أو كيميائياً (مثل تسييل الفحم). ويمكن نزع المواد الخام السائلة أو الغازية من الرِكازات بواسطة مضخات، أو أنها تنطلق ذاتياً. بعد ذلك، يجب

نقل المواد الخام بواسطة أحزمة ناقلة، أو مصاعد، أو أنابيب، أو خطوط أنبوبية إلى سطح الأرض. وفي أغلب الأحيان، تكون هذه المواد غير نقية ويمكن فقط استخدام جزء من المواد المتحررة (W_{sort}).

$$W_{free} = \sum W_{separate} + \sum W_{trans} + \sum W_{sort} \qquad (9)$$

لمثال استغلال رِكاز الحديد، يبيّن الجدول (6 ـ 1) الأدوات المهمة جداً والقطع المعرضة للإنهاك (في سلسلة تقدم العملية). ووزن التشغيل المحدد لأيّ أداة يعطى بوزنها بالنسبة إلى الطاقة الإنتاجية خلال العمر الزمني لها للاستعمال.

الجدول (6 ـ 1): إنفاقات المواد للأدوات لاستغلال الرِكاز ((Schaefer 1993)).

الجهاز	وزن التشغيل (طن متري (t))	الفقد في وزن التشغيل المحدد (إهلاك المادة) مقاساً بـ ($g.t_{steel}/t_{ore}$)
حفّار ذو حبل	3300	116
حزام ناقل (7 km)	181	12
حفّار ذو ذراع تحريك (لتعدين الحفرة المفتوحة)	14300	8
كسّارة مدوَّرة	119	2
كسّارة صدم	37	4
قطع معرضة للإنهاك	أقل من 1	429

الجدول (6 ـ 2): الحركات الأرضية وحركة الرِكاز المطلوبة لمختلف المواد ((Mauch) 1995).

المادة	وزن الرِكاز المطلوب (طن متري (t)) بالنسبة إلى الوزن النهائي للناتج ($t_{ore}/t_{product}$)
نحاس	1000
ألمنيوم	13.7
حديد خام	4.4
إسمنت	1.7

3-2-6 النقل

بالإضافة إلى التكاليف المباشرة لنقل الرِكاز إلى سطح الأرض، يجب أيضاً الأخذ بعين الاعتبار تكاليف النقل إلى محطة المعالجة وإلى المستهلك. يبيّن الجدول (6 ـ 3) والجدول (أ ـ 8) في الملحق مختلف وسائل النقل مع احتياجاتها المحددة لها من الطاقة وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون. ويجب حساب المسافة الفعلية للنقل، حيث إنه لا يؤخذ دائماً المسار الأقصر نتيجة أسباب فنية، واقتصادية، وسياسية (مثلاً، قناة السويس وقناة بنما).

الجدول (6 ـ 3): استهلاك الطاقة وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون لنقل الشحنة.

نوع النقل	الاستهلاك المباشر للطاقة (MJ/t.km)	انبعاثات CO_2 المباشرة kg/(tkm)	الاستهلاك المباشر + غير المباشر للطاقة (MJ/t.km)	انبعاثات CO_2 الكلّية kg/(tkm)	نوع الوقود	المرجع
باخرة شحن (خارجية)	0.09	0.0075	0.12	0.0094	HO 100٪	Frischknecht (1994)
باخرة حاويات 47000 t 43 km/h	0.029	0.0069	0.12	0.0086	HO 100٪	Frischknecht (1996)
باخرة شحن (داخلية)	0.48	0.04	0.84	0.063	D 100٪	Frischknecht (1994)
	0.51	0.0365	0.844	0.05863	D 100٪	Frischknecht (1996)
بحري (عام)			0.4	0.03		Lenzen (1999)
سكة حديدية[1]	48	0.0556	01.39	0.1137	E 51٪ D 49٪	Frischknecht (1994)
	319	0.0104	0.956	0.0513	E 80٪ D 20٪	Frischknecht (1996)
سكة حديدية (عام)			0.9	0.08		Lenzen (1999)

بري (t 40)	116	0.967	2.16	0.1606	D 100٪	Frischknecht (1994)
محمّل50٪	1	0.097	2.08	0.13637	D 100٪	Frischknecht (1996)
بـــــــري (عام)			1.7	0.13		Lenzen (1999)
جوي		65.10	5.40			Lenzen (1999)

يُعطى الاستهلاك المباشر للطاقة باستهلاك الوقود؛ والاستهلاك غير المباشر للطاقة يأخذ في الاعتبار إنهاك وسيلة النقل والبنية التحتية (الطرقات، السكك الحديدية). البيانات التفصيلية معطاة في الجدول (أ ـ 8) في الملحق[1]. يتضمن تحويل وتبديل القطار من خط سكة حديدية إلى آخر. تم حساب انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لـ (Frischknecht, 1994) باستخدام القيم الآتية: الكهرباء: 0.53 kg ثاني أكسيد الكربون لكل kWh (ألمانيا)، الوقود: 0.3 kg ثاني أكسيد الكربون لكل kWh، الاستهلاك اللاطاقي (وأيضاً الطاقة غير المباشرة): 0.23 kgثاني أكسيد الكربون لكل kWh (انظر Wagner) 1996)).

HO =نفط ثقيل D =ديزل E =تعمل بالكهرباء G = غازولين.

6-2-4 التحضير للإنتاج

من النادر جداً التمكن من استخدام المواد الخام مباشرة؛ وفي معظم الأحوال من الضروري إجراء الفصل (W_{sort}) والمعالجة ($W_{process}$). ومواد النفايات الناتجة يجب إما التخلص منها أو إعادة تدويرها (W_{waste}).

$$W_{prep} = \sum W_{sort} + \sum W_{process} + \sum W_{waste} \quad (10)$$

6-2-5 أعمال التشييد والمباني

الأجهزة المستخدمة لإنتاج المواد الخام ومحطة التصنيع نفسها تحتاج إلى إجراءات تشييد، مثلاً، المباني. وبناء هذه المباني يجب تضمينها في ميزانية إنتاج محطة الطاقة الفولتضوئية. ومن الصعب

تقدير العمر الزمني لأيّ مبنى: التحديث، أو الإغلاق، أو انتهاء الحرب الحادثة قبل العمر الزمني للمبنى (حوالى 100 سنة). تكاليف بناء الجدران مبيّنة في الجدول (6-4) وتكاليف بناء النوافذ في الجدول (6-5). وفي حالة استبدال مكونات المبنى بمكونات فولتضوئية (مثلاً بواجهات فولتضوئية، كما هو مبيّن لاحقاً) فإن هذين الجدولين مفيدان عند دراسة تكاليف التشييد التي يمكن تفاديها في الميزانية.

الجدول (6-4): متطلبات الطاقة لإنتاج جدران خارجية ((Geiger) 1993).

مكونات الجدار	سمك الجدار (cm)	سمك العازل (cm)	الوزن (kg/ m^2)	الموصلية الحرارية k (W/m	CEE_M (MJ/ m^2)
جدار ذو طوب مفرد (طوب خفيف ذو ثقب عالٍ)	40	0	440	0.76	972
جدار مركب ذو عازل حراري[1]	34	7	395	0.38	1220
جدار مركب ذو عازل حراري[1]	37	10	395	0.29	1277
جدار مركب ذو عازل حراري[1]	42	15	396	0.20	1372
جدار ذو طبقتين[2]	49	7	614	0.34	1742
جدار ذو طبقتين[2]	57	15	615	0.19	1894

1) طوب بتجويفات عمودية وطبقة من عازل حراري من الإستيروفوم (Styrofoam) (ماركة تجارية للبوليستيرين الموسع).
2) طوب بتجويفات عمودية طويلة، وطوب الجدار الأمامي بطبقة من عازل حراري من الإستيروفوم. CEE_M = إنفاق الطاقة المتراكِمة في أثناء التصنيع.

الجدول (6 ـ 5): متطلبات الطاقة لإنتاج نوافذ (Geiger 1993).

مادة الإطار	متطلبات الطاقة لكل m^2 من مساحة النافذة (MJ/m^2)	
	زجاج ذو لوحين عازل $k = 2.6\ W/(m^2K)$	زجاج للحفظ الحراري $k = 1.4\ W/(m^2K)$
خشب	934	1088
بلاستيك	1331	1485
ألمنيوم	3187	3340

يبيّن الجدول (6–14) الإنفاقات لتطبيقات التحركات الأرضية اللازمة لإقامة المبنى. للإسمنت، يفترض فريشكنيخت (1996) معدل انبعاث قدره 0.88 kg من ثاني أكسيد الكربون لكل كيلوغرام إسمنت؛ والمزيد من البيانات المفصلة لمتطلبات الطاقة وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون للخرسانة (المكونة من 12 في المئة إسمنت، و82 في المئة رمل وحصى، و6 في المئة ماء، بحسب الوزن)، أو لأيّ مواد بناء أخرى يمكن إيجادها في الجدول (أ ـ 5) في الملحق.

الحقيقة اللافتة هي أن متطلب طاقة التشغيل المتراكِمة بعد 50 سنة من الاستخدام لمبانٍ عادية جديدة نسبياً (مبنية وفقاً للمرسوم الألماني للحفظ الحراري لعام 1982) هو 75 في المئة من إجمالي متطلب الطاقة الأساسية. وللمباني المبنية وفقاً للمرسوم الأخير للحفظ الحراري لعام 1995، متطلب طاقة التشغيل سيكون 60 في المئة فقط. والمتطلب الإجمالي للطاقة الأساسية لمثل هذه المباني الجديدة يمكن أن يمثل $40\ GJ/m^2$ (Geiger 1993). في المستقبل، عملية الحفظ الحراري في أثناء مرحلة البناء يمكن أن تؤدي دوراً أكثر أهمية من مناقشتنا الحالية المتركزة على خفض تكاليف التشغيل - التي هي على الرغم من ذلك في غاية الأهمية.

6–3 الاستهلاك المباشر للطاقة في عملية الإنتاج

لتقدير متطلب الطاقة لعملية إنتاج محطات الطاقة الفولتضوئية،

يجب أن تؤخذ في الحسابات متطلبات الطاقة للخلايا الشمسية (W_{cell})، والمنظومة الشمسية (W_{module})، ووحدات تكييف الطاقة الكهربائية (W_{conv})، بالإضافة إلى متطلبات بنية الدعامة والقاعدة ($W_{support}$).

$$W_{pro} = \sum W_{cell} + \sum W_{module} + \sum W_{conv} + \sum W_{support} \quad (11)$$

6-4 إنتاج الخلايا الشمسية

لأن معظم التطبيقات الفولتضوئية الأرضية مستندة إلى الخلايا الشمسية السليكونية، فإن الاعتبارات الآتية تتركز عليها. السليكون هو العنصر الثاني الأكثر وفرة للقشرة الأرضية، ولهذا فهو تقريباً غير محدود. والسليكون له تركيب بلوري مستقر، وبالتالي فهو يمتلك عمراً زمنياً عالياً جداً (أكثر من 25 سنة). وطاقة شريط الفجوة للسليكون نسبياً مناسبة جداً لتحويل الطيف الشمسي إلى طاقة كهربائية. وعملية التخلص من السليكون مشابهة لتلك التي للزجاج، أي من دون مشاكل خطيرة. التحدي الرئيسي للإنتاج هو عملية التنقية التي يجب أن تؤدي إلى الحصول على سليكون نقي جداً يسمح بإنتاج خلايا شمسية فعالة، إلاّ أن ذلك يتطلب طاقة صغيرة قدر الإمكان.

6-4-1 إنتاج السليكون التقني (السليكون ذو الدرجة الفلزية)

يتم إنتاج السليكون التقني أو السليكون ذي الدرجة الفلزية (MG-Si) بمقاييس كبيرة لمتطلبات صناعة الألمنيوم والصلب، حيث يتم إنتاج حوالى مليون طن متري عالمياً كل سنة. ويتم اختزال مادة أكسيد السليكون (SiO_2) الخام على شكل الكوارتز أو الرمل بواسطة الكربون إلى سليكون، بينما ينبعث أول أكسيد الكربون أو ثاني

أكسيد الكربون. وتُجرى عملية الاختزال في أفران قوسية كبيرة بواسطة الكربون (على شكل خليط من شرائح الخشب، وفحم الكوك، والفحم الحجري) لإنتاج السليكون. يتم سكب السليكون السائل عند درجة حرارة 1500 °C بشكل دوري من الفرن (بنقاوة 98 إلى 99 في المئة) ويُنفخ بالأُكسجين أو خلطات من الأُكسجين/ الكلور لتنقيته بشكل أكبر (إلى حد 99.5 في المئة). بعد ذلك، يُسكب السليكون في أحواض ضحلة حيث يتصلب، ومن ثم يتم تكسيره إلى قطع غليظة. السعة الإنتاجية لفرن نموذجي هي طن واحد من السليكون ذي الدرجة الفلزية لكل ساعة. وباستخدام طريقة مبتكرة للتغذية (خلط قطع من الكوارتز وقوالب الرمل) فإنه يمكن خفض استهلاك الطاقة الكهربائية إلى 13 kWh/kg. ونقل، وإنتاج خليط التغذية، والتغذية، والطحن محسوبة بمقدار 1.6 kWh/kg.

المواد القابلة للاحتراق عند مستوى استهلاك الطاقة هي بشكل أساسي فحم الكوك والفحم الحجري المستخدمان لقوالب الرمل. والفقد في الطاقة لأكثر من 50 في المئة سببها هو الانبعاثات. وهذا يعطي فرصة كبيرة للنقصان، إلاّ أنها تحوي أيضاً خطراً تقنياً واقتصادياً كبيراً، ولهذا فهي لم تؤخذ بعد في الاعتبار.

6-4-2 السليكون ذو الدرجة الفلزية إلى السليكون المتعدد ذي الدرجة شبه الموصلة

للاستخدام في الخلايا الشمسية (وأيضاً للأجهزة شبه الموصلة الأخرى)، يجب أن يكون السليكون أنقى بكثير من السليكون ذي الدرجة الفلزية. والطريقة المعيارية للتنقية تعرَف بـ «العملية ـ C لسيمنس» (Siemens C-process). بعد الطحن (بحجم حُبيبي أقل 0.5 mm)، يتم تمييع السليكون ذي الدرجة الفلزية في مفاعل عند درجة

حرارة 300 °C إلى 400 °C بحمض الهيدروكلوريك (HCl) في وجود النحاس كمادة محفّزة فيتولد ثلاثي ـ الكلوروسايلين Trichlorosilane) ($SiHCl_3$)) وH_2. تمرَّر الغازات خلال مكثف. ويُخضع السائل الناتج إلى تقطير جزئي متعدد لإنتاج $SiHCl_3$. لاستخلاص السليكون النقي، يتم اختزال $SiHCl_3$ بواسطة الهيدروجين في مفاعل حيث يترسب السليكون إلى قضبان سليكونية مُسخّنة كهربائياً بدرجة حرارة 1.000 °C على شكل حبيبات ناعمة متعددة البلورة. وهذه الخطوة الأخيرة لا تتطلب الكثير من الطاقة فقط، بل أيضاً لها مردود منخفض مسبقاً (حوالى 37 في المئة وفقاً لـ (Green 1986)).

إنتاج السليكون ذي الدرجة شبه الموصلة (EG-Si) يتم إجراؤه بمقاييس كبيرة (حوالى 3000 طن متري في السنة) في محطات إنتاج كيميائية مركبة، ولهذا يجب اعتباره في اتحاد مادي وطاقي مع مدى الإنتاج الكامل للمحطة. على سبيل المثال، يجب الأخذ في الاعتبار استخدام نفايات رباعي ـ الكلوروسايلين ($SiHCl_4$)، الذي يخفض من كمية ثلاثي ـ الكلوروسايلين ($SiHCl_3$). يتم تغذية الحرارة الناتجة من المفاعلات في أثناء مراحل التبريد في الشبكة الأنبوبية البخارية لمحطة الإنتاج واستخدامها لمنتجات أخرى. هذا يؤدي إلى استبدال الوقود وبالتالي إيجاد طاقة إضافية قدرها 29.8 kWh/kg. الاستهلاك الكهربائي لهذه العملية هي 114.3 kWh/kg. ومع أن هذه العملية لاتزال توفر إمكانية التحسين من الناحية التقنية ومن الناحية الطاقية أيضاً، إلاّ أنه لا يمكن توقع تحسينات ذات أهمية كبرى في ظل الظروف الاقتصادية الراهنة.

6-4-3 إنتاج السليكون أحادي البلورة

للصناعة الإلكترونية شبه الموصلة، ليس مطلوباً فقط بأن يكون السليكون نقياً، بل يجب أن يكون أحادي البلورة أيضاً، وخالياً تماماً

من أيّ عيب في تركيبه البلوري. الطريقة المهمة المستخدمة لصناعة مثل هذه المادة تجارياً تسمى طريقة «تشوكارلسكي» (Czochralski). يتم صهر السليكون ذي الدرجة شبه الموصلة في بوتقة مع مستويات بسيطة جداً من ذرات التطعيم الشائبة. للخلايا الشمسية، تُستخدم عادة ذرات البورون كشوائب من النوع ـ م (*p*-type). وباستخدام بِذْرة بلورية في السليكون المنصهر، تنمو بلورة أسطوانية كبيرة واحدة من خلال سحبها ببطء من المادة المنصهرة. للقضبان الأحادية البلورة الناتجة قطر نموذجي يتراوح ما بين 125 mm إلى 130 mm، وطول يتراوح ما بين 1.5 m إلى 2 m. وتتم عملية سحب البلورة بسرعة 1 mm/min، ولهذا يجب الحفاظ على المادة المنصهرة عند درجة حرارة 1450 ^{o}C لساعات عديدة. وحتى مع العزل الحراري الجيد جداً، تم استنتاج فقد كبير في الطاقة بسبب انتقال الحرارة بالإشعاع الحراري من سطح المادة المنصهرة. ويمكن زيادة المردود فقط عن طريق زيادة قطر القضيب، الذي يمكن إجراؤه صناعياً إلى قطر 212 mm (8 بوصة)، انظر (Aulich, 1986). وباستخدام منشار يمكن نشر القضبان المدوّرة في أغلب الأحيان إلى أعمدة بمقطع عَرضي على شكل شبه مربع (رباعية بأركان مدوّرة)، انظر الشكل (6–3)، وذلك لزيادة ملء مساحة المنظومة الفولتضوئية.

بالإضافة إلى طريقة تشوكارلسكي، توجد أيضاً طريقة «المنطقة الطافية» (Floating Zone) التي تسمح بإنتاج خلايا شمسية بكفاءة عالية: يتم توجيه قوالب متعددة البلورة خلال حلقة تسخين حثية تقوم بصهر عمود السليكون محلياً. وبالرغم من أن قابلية ذوبان معظم الشوائب في المادة المنصهرة أفضل من قابلية ذوبانها في الجسم الصلب، إلاّ أنها تنتشر في المنطقة المنصهرة. بتحريك المنطقة المنصهرة على طول العمود بالكامل نحو الطرف النهائي للبلورة، يمكن انتزاع البلورة من الجزء الأوسط وتجميعها في الأطراف (حيث

يتم قطعها إلى شرائح لاحقاً). ويتم إجراء عملية التسخين والتبلور من دون لمس السليكون. وبتكرار هذه العملية عدة مرات ينتج سليكون بصورة أنقى. تحتاج هذه العملية إلى وقت كبير وإلى طاقة عالية، ما تجعل الخلايا المنتَجة بطريقة «المنطقة الطافية» غالية جداً، وبالتالي فإن استخدامها محدود بشكل أساسي على التطبيقات الفضائية.

6-4-4 السليكون ذو الدرجة شبه الموصلة إلى السليكون متعدد البلورة

يتم صهر السليكون ذي الدرجة شبه الموصلة (EG-Si) أيضاً تحت ضغط منخفض، وجو نقي، ثم يُصب بعد ذلك بسهولة في بوتقة. وعملية التبريد والتبلور تتم مع التحكم بدرجة الحرارة. ليس لقالب السليكون الناتج هنا الجودة العالية نفسها مثل ذلك الناتج بطريقة تشوكارلسكي أو المنطقة الطافية، إلاّ أنه جيد بما يكفي لصناعة خلايا شمسية فاعلة جداً[1]. وبدلاً من بلورة واحدة كبيرة، تتكون القوالب هنا من بلورات صغيرة عديدة، أو «حبيبات». ومعدل التبلور النموذجي هو 0.5 kg/min. تُقطع القوالب إلى أعمدة بقاعدة مربعة، ولاحقاً إلى شرائح (انظر الشكل 6-2). ووفقاً لويجمان (Wagemann, 1994)، الطريقة التقليدية لإنتاج السايلين (Silane) من أجل صناعة رقاقات متعددة البلورة لها متطلب محدد من الطاقة قدره 2300 kWh/kg (بمردود 8 في المئة، شاملاً القطع إلى شرائح بمناشير تثقيب مستديرة تقليدية (In-Hole Saws)، انظر أيضاً القسم 6-4-5).

---

(1) الخلايا الشمسية الصناعية متعددة البلورة بمساحة 100 cm^2 وصلت إلى كفاءة تحويل 15.8 في المئة (شركة شارب (Sharp). والنتائج المعملية لكفاءة التحويل هي 17.8 في المئة لخلية شمسية بمساحة 4 cm^2 (جامعة نيو ساوث ويلز (UNSW) وللخلايا التجارية متعددة البلورة كفاءة التحويل هي حوالى 15 في المئة (مثلاً، الخلايا - (Q-cells).

وبالمعالجة بحمام محلول قلوي مع سليكون ذي درجة شمسية (بمردود 35 في المئة)، يتطلب فقط 200 kWh/kg من الطاقة للقولبة في بوتقة والقطع إلى عدة شرائح بمنشار السلك المتعدد ـ الملاط (Multi-Wire Slurry Saw). يبيّن الجدول (6-6) ملخصاً بمتطلبات الطاقة النموذجية لنمو السليكون والكفاءات المحتملة للخلايا الشمسية استناداً إلى تلك المادة.

الجدول (6-6): متطلبات الطاقة لطرق النمو المختلفة للسليكون (Schmela, 2000).

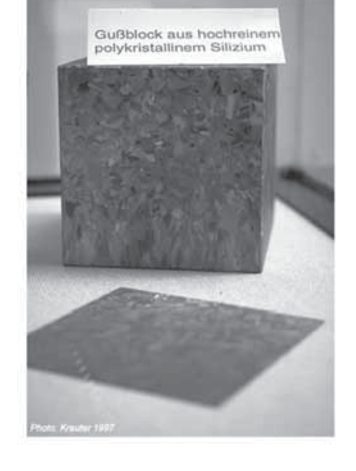
الطريقة	العرض (mm)	معدل النمو (mm/min)	إنتاج القالب (m^2/day)	استخدام الطاقة [1] (kWh/kg)	استخدام الطاقة[1] (kWh/m^2)	أفضل كفاءة [2]	الكفاءة النموذجية[2]
المنطقة الطافية (FZ)	200	3 ـ 2	80	30	36	24 في المئة	> 18 في المئة
تشوكارلسكي (CZ)	150	0.6 ـ 1.2	30	40 ـ 18	48 ـ 21	22 في المئة	> 15 في المئة
التصلب الاتجاهي (DS)	660	0.1 ـ 0.6	70	8 ـ 15 [3]	17 ـ 9	18 في المئة	> 14 في المئة
قولبة كهرومغنطيسية (EMC)	350	2 ـ 1.5	600	12	35	16 في المئة	> 14 في المئة
الشبكة المتفرعة	50	20 ـ 12	1	-	200	17 في المئة	> 15 في المئة
النمو بقالب الأنبوب الشعري (EFG)	800	20 ـ 15	20	-	20	16 في المئة	> 14 في المئة
السحب ذو الحافة المدعومة	80	20 ـ 12	1.7	-	55	16 في المئة	> 13 في المئة
تشكيل المادة المنصهرة التحتية	200	1000 ـ 6000	> 1000	-	-	16 في المئة	> 12 في المئة

ملاحظات: 1) استخدام الطاقة لنمو البلورة.
2) للخلايا الشمسية المستندة إلى تلك المادة ـ إذا استُخدِم SiN_x:H كطلية مضادة للانعكاس، فإن كفاءات الخلية يمكن أن تكون أعلى بمقدار 1,5 في المئة.
3) القيمة النموذجية هي 12 kWh/kg (مقدمة من قِبَل شركة الصناعة الكبرى GT Solar، 2006).

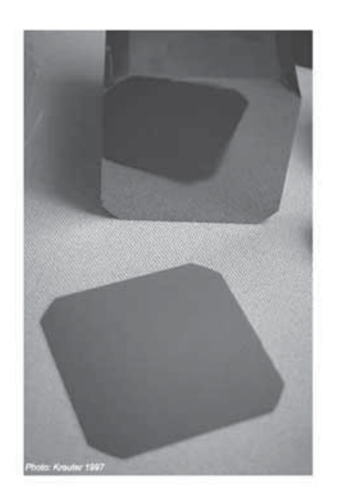
6-4-5 إنتاج الرقاقات السليكونية (الأحادية والمتعدد البلورة)

للأغراض الفولتضوئية، تحتاج خلايا السليكون إلى أن تكون بسماكة 0.1 mm فقط أو قريبة من هذه السماكة وذلك لامتصاص معظم الأطوال الموجية الملائمة من أشعة الشمس. ولهذا، يمكن قطع العمود البلوري الكبير الواحد (القالب) إلى شرائح (رقاقات) من السماكة نفسها. أغلب مناشير التثقيب المستديرة المستخدمة تؤدي إلى فقد في القَطْع قدره 50 في المئة عند أقل سماكة للرقاقة 0.45 mm (سواءً أكانت الرقاقة أحادية أم متعددة البلورة)، انظر الشكلين (6-3) و(6-2).

استخدام تقنية منشار السلك ـ الملاط يسمح بإنتاج رقاقات أنحف (0.2 mm) بتميّز كبير للقَطْع (فقد في القَطْع 0.1 mm فقط) وتشوهات بلورية أقل. وهذا يقلل من استنفاذ السليكون ومحصلة استهلاك الطاقة. علاوة على ذلك، يمكن قطع عدة مئات من الرقاقات في الوقت نفسه ـ وحتى القالب بأكمله (البالغ طوله 1.6 m) يمكن تشريحه إلى رقاقات. أما مناشير التثقيب المستديرة فإنها تنتج رقاقة واحدة فقط في الوقت نفسه. في منشار السلك ـ الملاط، يتم مد سلك سماكة 0.18 mm، وطوله بحدود 200 km بواسطة أربع أسطوانات توجيه دوّارة إلى مربع، بينما يتحرر السلك من بكرة اللف بسرعة 5 m/s. وتُجرى عملية القطع باستخدام كربيد سليكون بحجم حُبَيْبي 12 μm، معلّق في زيت القَطْع. يعمل زيت القَطْع كحامل لكربيد السليكون ولنقل الحرارة أيضاً. وتعاني رقاقات السليكون الأنحف من هشاشة عالية ويجب التعامل معها بعناية كبيرة.



الشكل (6-2): قالب سيليكوني متعدد البلورة بمقطع عرضي على شكل مربع.



الشكل (6-3): قالب سيليكوني أحادي البلورة بمقطع عرضي على شكل شبه مربع مع إحدى الرقائق في مقدمة الصورة (الصورتان مأخوذتان في HMI في برلين).

6-4-6 الرقاقات الأحادية البلورة إلى خلايا شمسية أحادية البلورة

لكي تصبح خلية شمسية أحادية البلورة فاعلة، تمر الرقاقات خلال العمليات الآتية:

- التنظيف بواسطة «الصقل» (التلميع الناعم باستخدام Al_2O_3 بحجم حُبيْبي 10 μm كوسط حاك) لإزالة الضرر الذي سببه عملية قطع الرقاقة.
- النسج عن طريق الحفر الكيميائي للضرر (بسائل كيميائي من KOH كمادة حافرة) لتكوين تركيب شبه هرمي يعمل كطبقة مضادة للانعكاس الضوئي (Antireflective Layer) (أو عن طريق رشرشة TiO_2 أو Ta_2O_5 في الفراغ وتلبيدها عند درجة حرارة 400 °C ـ بعد ترسيب أطراف التوصيل الكهربائية).
- التطعيم بالشوائب: ذكرنا في القسم السابق أنه، في تقنية صناعة

الخلية الشمسية المعيارية، يضاف البورون عادة إلى السليكون المنصهر، الأمر الذي يؤدي إلى إنتاج رقاقات نوع ـ م (*p*-type). لتكوين خلية شمسية، تضاف شوائب نوع ـ س (*n*-type) لإنتاج وصلة م ـ س (*p-n* junction)، والفوسفور هو الشائب المستخدم عادة. في العمليات الشائعة جداً، يتم إرسال فقاعات من غاز ناقل خلال فوسفور كلوريد الأُكسجيني ($POCl_3$)، ومزجها مع مقدار ضئيل من الأُكسجين، وإمرارها في أنبوب فرني ساخن حيث تتراص فيه الرقاقات. هذا يؤدي إلى نمو طبقة أكسيد على سطح الرقاقات المحتوية على الفوسفور (زجاج فوسفوري). عند درجة حرارة 800 ^oC إلى 900 ^oC ينتشر الفوسفور من طبقة الأكسيد إلى داخل السليكون. بعد 20 دقيقة، تطغى شوائب الفوسفور على شوائب البورون في المنطقة السطحية للرقاقة وتولِّد منطقة رقيقة مطعّمة بشكل كثيف من النوع ـ س. وفي بعض الأحيان، يُجرى غرز بورون إضافي لتوليد مجال سطحي خلفي (Back-Surface Field) عن طريق «انتشار ـ الباعث» (Emitter-Diffusion) (أي انتشار الطور الغازي عند درجة حرارة 900 ^oC).

- إزالة أكسيد الفوسفور (الزجاج الفوسفوري) عن طريق عملية كيميائية سائلة عند درجة حرارة 20 ^oC إلى 60 ^oC، إذا تطلب الأمر، تقوم بإزالة الوصلات من الأجزاء الجانبية والخلفية للخلية.

- إضافة أطراف التوصيل الكهربائية: في التقنية المعيارية، هذه العملية تعرف باسم «التبخير المفرَّغ». في هذه العملية، يُسخن الفلز الذي سيتم ترسيبه، عادة الألمنيوم (Al)، في الفراغ إلى أن يتبخر. سيتكاثف البخار الفلزي بعد ذلك في الخلايا الشمسية الأبرد مكوّناً طرفاً للتوصيل الكهربائي. لتكوين أطراف توصيل خلفية، يتم ترسيب الفلز عادة على كامل السطح الخلفي. ويُستخدم قناع ظلي لعمل أطراف التوصيل الأمامية وإيجاد نمط على شكل شبكة على السطح العلوي للخلايا الشمسية (هذه العملية تسمى

«عملية الطباعة الشبكية»). المادة المستخدمة هنا هي عادة Ti/Pd/Ag. بعد ذلك، يتم تلبيد أطراف التوصيل عند درجة حرارة 400 °C في فرن أشعة تحت الحمراء.

- تكوين الطبقة المضادة للانعكاس الضوئي يتم عادة عن طريق رشرشة TiO_2 أو Ta_2O_5 في الفراغ وتلبيدها عند درجة حرارة 400 °C. في الوقت الحاضر، التقنية الحديثة هي استخدام نيتريد السليكون المهدرج (SiN_x:H) التي ترفع كفاءات الخلية بمقدار 1.5 في المئة.

- الفحص: الفحص المرئي للخلايا - التحقق من تجانس الطبقة المضادة للانعكاس. الفحص الميكانيكي ـ متانة التئام أطراف التوصيل. الفحص الكهروضوئي ـ تسجيل خصائص التيار ـ الجهد عند إشعاعية مساوية لطَيْف قدره AM 1.5، وتصنيف الخلايا إلى مجموعات متكافئة من حيث تيار قصر الدائرة وعامل التشكُّل.

استهلاك الطاقة الكهربائية لهذه العمليات في نموذج الحالة الأول: 216 kWh لكل m^2 من مساحة الخلية، واستهلاك الوقود 116 kWh/m^2، واستهلاك الوقود اللاطاقي 12 kWh/m^2. ولنموذج الحالة الثاني: استهلاك الطاقة الكهربائية 102 kWh/m^2، واستهلاك الوقود 39 kWh/m^2، واستهلاك الوقود اللاطاقي يظل ثابتاً عند 12 kWh/m^2. يمكن الحصول على اشتقاق أكثر تفصيلاً لهذه الحسابات في الملحق.

بالرغم من أن العديد من العمليات، مثل انتشار الطور الغازي، تُظهر حِمل قاعدي عالٍ، إلا أن الاستخدام الفعلي للسعة الإنتاجية يحدد استهلاك الطاقة في المعالجة. واستهلاك الطاقة للمعالجة يمكن خفضه إلى 30 في المئة من الحالة الأصلية فقط من خلال التغيير من أسلوب التشغيل بنوبة واحدة إلى أربع نوبات تشغيل (Hagedorn 1989). الاستهلاك الإضافي للطاقة عن طريق التغير المناخي، والتهوية، والإضاءة. . . إلخ مناهز تقريباً للطاقة المطلوبة للمعالجة.

6-4-7 الرقاقات المتعددة البلورة إلى خلايا شمسية متعددة البلورة

إنتاج خلايا شمسية متعددة البلورة مشابه لإنتاج خلايا شمسية أحادية البلورة، إلاّ أنه يتطلب خطوة إضافية وهي «إكساب السلبية» (Passivation) بواسطة الهيدروجين للحدود الحُبيبية للمادة المتعددة البلورة:

- التنظيف عن طريق الحفر الكيميائي للأكسيد في KOH.
- التطعيم بالشوائب (انتشار الباعث): تجارياً عن طريق عملية الطباعة الشبكية بطبقة فوسفورية، ومن ثم الانتشار في فرن أشعة تحت الحمراء عند درجة حرارة 900 °C لمدة قصوى 30 min (تؤدي إلى عمق انتشار 0.3 µm إلى 0.5 µm) ـ في الوقت الحاضر، يفضَّل غالباً انتشار الغاز.
- إزالة الزجاج الفوسفوري بواسطة عملية كيميائية سائلة.
- إكساب السلبية للحدود البلورية: معالجة الرقاقات في بلازما هيدروجيني عند درجة حرارة 300 °C لمدة 30 min.
- إضافة أطراف التوصيل الكهربائية: الطباعة الشبكية (الجزء الخلفي بعجينة إلصاق Ag/Al، والجزء الأمامي بعجينة إلصاق Ag) والتلبيد في فرن أشعة تحت الحمراء (عند درجة حرارة قصوى 700°C لمدة 20 min).
- تكوين الطبقة المضادة للانعكاس عن طريق عملية الطباعة الشبكية بطبقة من TiO_x وتلبيدها عند درجة حرارة الغرفة (20°C).
- الفحص: الفحص المرئي للخلية: فحص تجانس الطلية المضادة للانعكاس ((Antireflective Coating (ARC))، والفحص الميكانيكي: متانة التئام أطراف التوصيل، والفحص الكهروضوئي للخلية: تسجيل خصائص التيار ـ الجهد عند إشعاعية مساوية لطيف قدره 1.5 AM، وتصنيف الخلايا إلى مجموعات متكافئة من حيث تيار قصر الدائرة وعامل التشكُّل.

استهلاك الطاقة الكهربائية لهذه العمليات مختلف جداً عن تلك للخلايا الشمسية أحادية البلورة: استهلاك الطاقة الكهربائية لنموذج الحالة الأول هو 213 kWh لكل m^2 من مساحة الخلية، واستهلاك الوقود هو $107 kWh/m^2$، واستهلاك الوقود اللاطاقي هو $8 kWh/m^2$.

لنموذج الحالة الثاني، استهلاك الطاقة الكهربائية هو $89 kWh/m^2$، واستهلاك الوقود هو $34 kWh/m^2$. استهلاك الوقود اللاطاقي هو $10 kWh/m^2$ (Hagedorn, 1989). باستخدام رقاقات ذات سماكة 0.2 mm فقط والتحويل إلى أربع نوبات تشغيل، يمكن للمصنع أن يقلل من استهلاك الطاقة الأساسية وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار النصف.

6-4-8 إنتاج الخلايا الشمسية السليكونية الأمورفية

هذه الخلايا مصنوعة من أغشية رقيقة من السليكون الأمورفي المدمج بنسبة صغيرة من الهيدروجين. وهذا يقلل كثيراً من المقاومة الكهربائية للمادة ويسمح لها بأن تُطعَّم بذرات شائبة من النوع ـ س أو النوع ـ م. وتصميم هذه الخلايا يحسِّن من تجمع التيار من خلال الحصول على طبقة رقيقة جداً من النوع ـ س والنوع ـ م مع طبقة نقية (Intrinsic (*i*)) سميكة بما يكفي لامتصاص تقريباً جميع الضوء الساقط، لتعطينا بنية *p-i-n*. المجال الكهربائي المتولد بواسطة الوصلة *p-n* يتوسع خلال الطبقة ـ i ويساعد كثيراً على تجمع حاملات الشحنة المتولد ضوئياً. لسوء الحظ، تنحل الخصائص الكهربائية للطبقة ـ i عن طريق امتصاص الضوء فتقل كفاءة الخلايا مع التعرض لضوء الشمس. هذا التأثير يمكن تقليله، لكن لا يمكن التخلص منه، من خلال التحكّم بعناية بظروف الترسيب، كما يمكن تقليله بشكل إضافي باستخدام وصلات متعددة، كلٌّ منها ذات طبقة ـ i أنحف.

أفضل كفاءة تم تسجيلها حتى الآن للخلية الشمسية السليكونية الأمورفية هي 13.6 في المئة على وصلة ثلاثية متراصة.

6-4-9 إنتاج الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات أخرى

زرنيخيد الجاليوم (GaAs)

يمتلك شبه الموصل GaAs تقنية مطورة جداً تعتمد على الاهتمام التجاري لهذه المادة لإنتاج الدايودات الباعثة للضوء الأزرق وليزرات أشباه الموصلات. وبسبب طاقة الفجوة المثالية تقريباً لهذه المادة وكفاءتها المقابلة للطيفية، فإن معظم الخلايا الشمسية الفاعلة قد استندت إلى GaAs. إلاّ أن الموارد المحدودة للجاليوم (بإنتاج حوالى 30 tons/a فقط) تكفل بأن GaAs سيكون دائماً مادة خلية شمسية غالية. لأنظمة التركيز الشمسية، يمكن خفض مقدار المادة المطلوبة لنتاج القدرة المعني. وفجوة الطاقة المباشرة لشبه الموصل GaAs تعني أيضاً أن الإشعاعية يتم امتصاصها بشكل سريع جداً بعد دخولها إلى المادة، ولهذا يتطلب فقط طبقات بسماكة بضع ميكرونات. الميزة السيئة جداً لهذه المادة هي الطبيعة السامة للزرنيخ، وبالتالي فإن النتائج البيئية من نشر الكثير من أنظمة الطاقة الشمسية المصنَّعة من GaAs سيتوجب فحصها بعناية.

الجدول (6 ـ 7): استهلاك الطاقة المتراكِمة لإنتاج رقاقات السليكون.

النوع/ الطريقة	سليكون ذو درجة فلزية (kWh/kg)	سليكون ذو درجة شبه موصلة (kWh/kg)	خلية سليكون (kWh/kg)	النشر بالمنشار (kWh/kg)	المردود (m^2/kg)	المرجع
سليكون أحادي البلورة	-	416	150	5	0.38	Aulich [et al.] 1986
	-	139 (أنقى Si)	150	5	0.38	Aulich [et al.] 1986
	20	200			0.856	Palz [et al.] 1991
	20	100				Hagedorn, 1989a
	14.6	114.3 (−29.8)				Hagedorn, 1989
سليكون متعدد البلورة	-	416 (139)	25	5	0.38	Aulich [et al.] 1986 (قولبة في بوتقة)
	-	416 (139)	35	< 5	> 0.4	Aulich [et al.] 1986 (الأنبوب الشعري)
	-	416 (139)	7	< 5	> 0.4	Aulich [et al.] 1986 (الشبكة المتفرعة)
	20	100				Hagedorn, 1989a
	14.6	114.3 (−29.8)				Hagedorn, 1989
	20	200		20	0.856	Palz [et al.] 1991

الحالات: الحالة الأولى: 2 MW_p/a، بنوبة تشغيل واحدة لمحطة الإنتاج. الحالة الثانية: 25 MW_p/a، بأربعة نوبات تشغيل لمحطة الإنتاج.

خلايا كبريتيد النحاس ـ كبريتيد الكادميوم (Cu_2S-CdS)

للخلايا الشمسية المصنَّعة من CdS تاريخ مرتبط بالتطور يعود إلى عام 1954. منذ ذلك الحين، كانت هناك العديد من المحاولات لإنتاج خلية شمسية تجارية تستند إلى هذه المادة. الميزة اللافتة لهذه الخلايا هي السهولة التي تكمن في تصنيعها. ولأن CdS المتعددة البلورة ذات الحبيبات الناعمة ملائمة أيضاً كمادة تحتية لترسيب مواد أخرى عليها، فإن هناك العديد من الخيارات المتوافرة لتحضير هذه المادة التحتية. تبدو طريقة التبخير والرش في تفريغ هوائي أنها الطريقة الواعدة جداً

للتحضير. المزايا السيئة جداً لهذه الخلايا هي كفاءتها المنخفضة وافتقارها إلى الاستقرارية المتأصلة التي تمتلكها الخلايا الشمسية السليكونية. بهذه الكفاءة المنخفضة، تصبح تكاليف الأجزاء الأخرى في النظام أكثر أهمية لأن المساحة المطلوبة لخرج معين ستزداد. وتكاليف اتزان النظام، مثل تلك المطلوبة لتجهيز الموقع، وبنية الدعامة، وتوصيل الأسلاك يمكن أن تطغى على تكاليف النظام الفولتضوئي لدرجة أنه حتى لو كانت الخلايا مجانية فإنه من الأرخص استخدام خلايا ذات كفاءة أعلى بتكلفة أعلى. وكقاعدة أساسية، فإن الكفاءة 10 في المئة للمنظومة هي الحد الأدنى التي ربما يمكن التسامح بها لتوليد طاقة فولتضوئية مربحة واسعة النطاق (Green, 1982).

توزيع إنتاج الخلية بحسب التقنية

(المرجع: (P. D. Maycock)، أخبار سوق الفولتضوئية *PV market update*، 2003)

- سليكون متعدد البلورات 58 في المئة
- سليكون أحادي البلورة 32 في المئة
- تقنية الأغشية الرقيقة 7 في المئة
- أخرى 3 في المئة

6-5 إنتاج المنظومات الفولتضوئية

يتم توصيل من ست إلى اثنتي عشرة خلية شمسية على التوالي لتنتج ما يسمى «سلسلة». وتحتوي الخلية المتصلة بالعرى عادة على أسلاك فضية مفلطحة. تتم عملية التلامس بعد ذلك بواسطة اللحام النقطي أو اللحام بالأشعة تحت الحمراء. في الوقت الحاضر، تُستخدم عُرى من الأسلاك الفضية المفلطحة (بسماكة 100 µm ـ 200 µm)، مغلفة بسبيكة تتكون من 60 في المئة قصدير (Sn)، و38 في

المئة رصاص (Pb)، و2 في المئة فضة (Ag). ويتم لحام تلك العُرى بواسطة اللهب، أو الأشعة تحت الحمراء، أو الهواء الساخن، أو الليزر، أو التيارات الدوامة. لتفادي الرصاص الخطر، تُستخدم سبيكة طلي من المادتين الأخريتين بشكل متزايد بنسبة 96.50 في المئة Sn و3.5 في المئة Ag، إلاّ أن درجة حرارة الانصهار لهذه السبيكة أعلى بمقدار 40 K. و3 إلى 12 من هذه السلسلة تعتبر الأساس للمنظومة الشمسية (أو المنظومة الفولتضوئية)، التي تحمي المولد الفولتضوئي من العوامل الجوية والبيئية. من أجل ذلك، يتم تصفيح مصفوفة الخلية مع لوح زجاجي أمامي، وبلاستيك شفاف، وزجاج أو رقاقة خلفية. البلاستيك المستخدم بشكل شائع جداً لهذا الغرض هو البوليمر المشترك: أسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين (EVA). ورقاقة الجانب الخلفي تتكون غالباً من تصفيح من التيدلر ـ البوليستر ـ التيدلر أو التيدلر ـ الألمنيوم ـ التيدلر. والتيدلر (Tedlar) هو الاسم التجاري لغشاء الفلوريد متعدد الفينيل (PVF).

وتكتمل المنظومة بإطار من الألمنيوم، أو الفولاذ المقاوم للصدأ، أو البلاستيك مع صندوق طرفي. يعمل إطار الألمنيوم على زيادة الطاقة المطلوبة لإنتاجية المنظومة بمقدار 215 kWh لكل متر مربع من مساحة المنظومة (انظر (Aulich [et al.] 1986)). لهذا الغرض (وأيضاً للتقليل من التكاليف)، أصبحت المنظومات الفولتضوئية اللاإطارية تُستخدم بشكل متزايد. وتتم أعمال التركيب والتثبيت لبنية الدعامة عادة بواسطة صواميل تثبيت، وفي بعض الأحيان باستخدام غراء تثبيت. وتنخفض متطلبات الطاقة وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون بشكل كبير من خلال استخدام المنظومات اللاإطارية.

الجدول (6 ـ 8): متطلبات الطاقة الإجمالية (GER) لمواد المنظومة (Alsema, 1998).

المادة	الكثافة (kg/m^3)	GER (MJ/kg)	دقة البيانات	منطقة التحقق من صحتها	المرجع
زجاج عائم	2500	15	جيدة جداً	EU	Gelen, 1994 Hantsche, 1991
ألمنيوم أساسي	2700	190	جيدة جداً	EU, US	Worrell, 1994
ألمنيوم ثانوي	2700	18	جيدة جداً	EU, US	Gelen, 1994
صفيح ألمنيوم معالج بالأنود (من الألمنيوم الأساسي)	2700	220	جيدة جداً	EU, US	Keoleian and Lewis, 1997 Worrell 1994 Gelen, 1994
أسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين EVA	900	75	معتدلة	EU	Gelen, 1994
فلوريد متعدد الفينيل PVF (Tedlar)	1800	115	معتدلة	EU	Gelen, 1994

EU = الاتحاد الأوروبي US = الولايات المتحدة الأميركية.

6-5-1 عملية التصفيح

التركيب الذي تتألف منه المنظومة (زجاج ـ EVA ـ خلايا شمسية ـ EVA ـ زجاج، وأيضاً زجاج ـ EVA ـ خلايا شمسية ـ EVA ـ تصفيح خلفي) يتم تخليقه باستخدام الضغط والحرارة. وعادة، تستخدم أجهزة تصفيح مفرَّغة في أثناء عملية التصفيح الكاملة (تسخين، وإنضاج البوليمر المشترك EVA، والتبريد). سنناقش هنا طرق أخرى، مثل استخدام فرن منفصل للإنضاج تحت ضغط معتاد. «الإنضاج» (curing) تحت ضغط معتاد يقلل من زمن الدورة في الإنتاج الضخم كما إن جهاز التصفيح يمكن إعادة تعبئته بشكل سريع. وينخفض الفقد في الطاقة لأن جهاز التصفيح لا يحتاج إلى تبريد. واستخدام أسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين «سريع النضوج» الحديث كتغليف يعمل على انخفاض مرحلة الإنضاج

من 22 دقيقة إلى 4 دقائق؛ ما يؤدي بالتالي إلى خفض ميزة المعالجة المنفصلة أو «المعدَّلة». نناقش في ما بعد في القسم الآتي جهاز تصفيح مفرَّغ بنظام تسخين وتبريد مدمج. ونظراً إلى أهمية كفاءة الطاقة والخفض الممكن لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون، نناقش المعالجة المنفصلة الحديثة أيضاً ضمن مقترح الشركة النمساوية Isovolta AG لجهاز تصفيح «تمريري».

في الوقت الحاضر، تُستخدم طريقة «درجة الحرارة الثابتة» عند 150 °C بشكل متزايد، وذلك للتحكم بطرح ورفع المنظومات من ألواح التسخين في الفرن المفرَّغ. تزيد هذه الطريقة من الطاقة الإنتاجية للتصنيع بشكل كبير. وفي اليابان، الطريقة المفضلة هي المعالجة بمرحلتين. في هذه الطريقة، التصفيح المسبق في جهاز التصفيح المفرَّغ ومن ثم الإنضاج في فرن ذي هواء دائر يعملان على تفادي التكلفة الإضافية لمعالجة الأسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين «سريع النضوج».

في المستقبل، قد يؤدّي «البلاستيك الحراري متعدد اليوريثين» ((Thermoplastic Polyurethane (TPU)) دوراً رئيساً، لأنه لا يتطلب أيّ زمن إنضاج، كما يتم تطوير جهاز تصفيح ملائم ذي بكَرة من قِبَل شركة Bayer. إلاّ أن تكاليف TPU لا تزال ضعف تكاليف EVA المعياري.

تمر الأجهزة المستخدمة لعملية التصفيح بتطور سريع - الأسماء التجارية والقيم المعطاة في الجداول أدناه تمثل فقط أمثلة نموذجية لحساب متطلبات الطاقة المحددة للمنظومات الفولتضوئية.

6-5-1-1 جهاز التصفيح المدمَج

يقوم غشاء حيوي مرن في اللوح الغطائي لجهاز التصفيح المفرَّغ (الذي يوجد غرفة منفصلة) بإنشاء الضغط اللازم على التصفيح (المسخَّن بواسطة لوح تسخين من الأسفل) من خلال تطبيق ضغط الوسط المحيط على سطحه العلوي (تحرير التفريغ). وخطوات عملية التصفيح المقترحة من قِبَل شركة Isovolta لأسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين العادي هي:

1 ـ قم بتعبئة التصفيح (90 °C)، وكوّن تفريغاً حوالى 10 mbar.

2 ـ ارفع درجة الحرارة من 90 °C إلى 155°C خلال 10 دقائق (بمعدل 6.5 K/min).

3 ـ عند 120 °C يتم تكوين ضغط الغشاء الحيوي من خلال تطبيق ضغط الوسط المحيط على الجزء العلوي للوح.

4 ـ بعد الوصول إلى 155°C، حافظ على درجة الحرارة لمدة 15 دقيقة.

5 ـ قم بالتبريد من 155°C إلى 90 °C خلال 10 دقائق (بمعدل 6.5 K/min).

6 ـ بعد الوصول إلى 100 °C افتح جهاز التصفيح.

وخطوات عملية التصفيح وفقاً لشركة «Springborn» (انظر Photocap 1996) لأسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين «سريع النضوج» والعادي هي:

1 ـ قم بالتسخين المسبق لألواح التسخين لجهاز التصفيح إلى 75°C .

2 ـ أضف اثنين من السليكون أو رقاقة تيفلون (Teflon) فاصلة، وقم بتعبئة جهاز التصفيح.

3 ـ كوّن تفريغاً في أسفل جهاز التصفيح (أقل من 1.3 mbar، يتم بلوغه بعد 3 دقائق).

4 ـ قم بإنشاء ضغط (1 bar) في اللوح الغطائي لجهاز التصفيح بمجرد أن تصل درجة الحرارة إلى °C 60 (أيضاً بعد 3 دقائق)، واستمر بالتسخين.

5 ـ الإنضاج (بعد 8 دقائق من التعبئة):

لأسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين العادي عند درجة حرارة °C 155 : 22 دقيقة.

لأسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين «سريع النضوج» عند درجة حرارة 145 °C : 4 دقائق.

6 ـ افتح، وقم بالتبريد، وإفراغ التعبئة بعناية (لا يزال EVA طرياً).

7 ـ قم بوضع درجة الحرارة على °C 75 للدورة الآتية.

الاختلافات الرئيسة لهذه الطريقة عن طريقة معالجة Isovolta هي الانحدار الحاد في معدل درجة الحرارة إلى الزمن بمقدار K/ 15 min (بدلاً من 6.5K/min) والضغط عند °C 60 (بدلاً من 120°C)، قبل نقطة الانصهار لأسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين عند 80°C.

لمقارنة استهلاك الطاقة الأساسية للتسخين، يُفترض أن يتم توليد الطاقة الكهربائية لتسخين الألواح عند كفاءة 35 في المئة. والفقد عن طريق التوصيل الحراري إلى الاحتواء والحمل لجهاز التصفيح المفرّغ يتم إهماله.

نتيجة للعزل الحراري الجيد لفرش التسخين نحو الوسط المحيط، يشتمل استهلاك القدرة أساساً على التدفق الحراري من السخان إلى الصفيح وفرش التسخين الكهربائي نفسه. ويحتاج صفيح كبير بمساحة ($3\ m^2$) وسماكة (5 mm) يتكون من زجاج، وأسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين، وخلايا شمسية إلى حوالى 1 kWh من الطاقة لتسخينه من °C 25 إلى °C 150، أي إن:

$$Q_{laminate} = c_p \rho V (155\,^{o}\mathrm{C} - 20\,^{o}\mathrm{C}) = 1.164\ \mathrm{kWh}$$

باستخدام

$c_p = 0.23\ \mathrm{Wh/(kg \cdot K)}$ و $\rho = 2500\ \mathrm{kg/m^3}$ (للزجاج).

ويلزم طاقة حرارية مقدارها 8.73 kW إذا توجب الوصول إلى درجة الحرارة النهائية خلال 8 دقائق. لفرش التسخين، الذي يزن 37.5 kg بسعة حرارية للنحاس، يجب إضافة قدرة أخرى 0.547 kW؛ وبالتالي يتطلب قدرة إجمالية 12.83 kW. والقدرة اللازمة للتبريد مساوية لذلك أو أقل، بالرغم من أن التصفيح يمكن إزالته عند 90°C. وإذا تم استخدام نظام تبريد مبني من أنابيب (بدلاً من التهوية الهوائية)، فإن سعته الحرارية يجب أن تؤخذ في الحسابات أيضاً. وقد افتُرِض بأن 10 في المئة من إجمالي استهلاك القدرة مطلوبة للحفاظ على درجة حرارة 155°C.

6-5-1-2 جهاز التصفيح «التمريري»

دورات درجة الحرارة لعملية «التمرير» هي نفسها كما للعملية التي تتم باستخدام جهاز التصفيح المدمج. هنا، يتم نقل التصفيح بواسطة حزام ناقل خلال جهاز التصفيح المفرَّغ، وفرن الإنضاج، ومنطقة التبريد. وزمن الدورة هو 10 دقائق.

تقدم شركة Isovolta استهلاك طاقة مقداره 30 kW للنظام كاملاً، بالرغم من أن 9 kW مطلوبة لجهاز التصفيح المفرَّغ (لتصفيح بمساحة $1.2\ \mathrm{m^2}$)، و12 kW لفرن إنضاج مضاعف الحجم، والباقي لتهوية التبريد، وتحكم العملية، والمعالجة. ووفقاً لشركة Springborn، يتطلب التصفيح ثلاث دقائق من الضخ ليكون من دون فقاعات هوائية، كما يمكن الضغط عندما تصل درجة الحرارة إلى

60 °C، وفي الوقت نفسه تتم زيادة طاقة التسخين وإبقاؤها عند درجة حرارة 155 °C. توضح البيانات المبيّنة في الجدولين (6-9) و(6-10) كيف أن التصفيح الآني لعدد من المنظومات يقلل من استهلاك الطاقة بشكل كبير (بمقارنة النوع ICOLAM II من شركة Isovolta بالنوع 460 SPI من شركة Spire). ولجميع أنواع أجهزة التصفيح، استهلاك الطاقة لكل دورة تم حسابه لفترة تسخين 8 دقائق عند أقصى قدرة. وتم أخذ استهلاك القدرة للحفاظ على درجة الحرارة على مدى 4 دقائق و22 دقيقة باستخدام 10 في المئة من القيمة القصوى للقدرة. زمن الدورة لجهاز التصفيح لأسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين العادي يمكن مساواته بأسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين «سريع النضوج» إذا استُخدِم «فرن إنضاج» إضافي، إلاّ أن ذلك يضيف 10kW إضافية لمتطلب القدرة. ونتيجة زمن الدورة القصير البالغ 4 دقائق، فإن جهاز التصفيح المدمج باستخدام أسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين «سريع النضوج» يمتلك طاقة الاستهلاك الأدنى. وفقاً للبيانات المقدمة من قِبَل شركات التصنيع والتقديرات المعطاة في الجدولين فإن عمليات التصفيح، والإنضاج، والتبريد في النوع ICOLAM II ليس له تأثير إيجابي في خفض تدفقات الطاقة[2]. تؤدّي عملية التصفيح بواسطة أجهزة التصفيح التقليدية إلى استهلاك طاقة أساسية قدرها $3\ kWh/m^2$. وباستخدام تبريد فاعل، القيمة الفعلية هي $5\ kWh/m^2$.

(2) لخفض الفقد في القدرة عن طريق تغيير درجة حرارة لوح التسخين، قامت شركتان لتصنيع أجهزة تصفيح منذ عام 1996 (NPC وS.E. المشروع: 26 KW لأربع منظومات ذات قدرة قصوى $83,6\ W_p$ لكل منها) بالحفاظ على درجة حرارة ألواح التسخين ثابتة عند 155 C° وحث عملية التبريد من خلال رفع التصفيح عن لوح التسخين. ووفقاً لشركتي التصنيع فإن استهلاك الطاقة هو 2 في المئة فقط من ذلك لأجهزة التصفيح التقليدية. والواقع الفعلي يتوقع توفيراً 30 في المئة طبقاً للعلاقة بين السعة الحرارية للتصفيح والسعة الحرارية للوح التسخين.

الجدول (6-9): متطلبات القدرة والطاقة لعملية التصفيح بخلايا مربعة 10 cm.

نوع جهاز التصفيح	الطول × العرض (cm)	القدرة (kW)	الماء (دورة/l)	الدورة (min)	عدد المنظومات لكل دورة	النتاج (منظومة/ سنة)	النتاج سنة/MW_p	استهلاك الطاقة الكهربائية (kWh/ kW_p)
460 SPI	200 137 x	165	30	33	3	10800	0.78	12.98
460 SPI، سريع النضوج	200 137 x	165	30	15	3	23760	1.71	11.71
ICOLAM II	80 150 x	30	40	10	1	12000	0.86	55.56
Solarwerk	230 150 x	20	0	33	4	17600	1.15	11.81
Solarwerk، سريع النضوج	230 150 x	20	0	15	4	38720	4.32	9.73

نوع المنظومة: -800PL، ومقاس المنظومة: 122 cm x 56 cm، والقدرة: $72W_p$؛ و3 دقائق للتعبئة وإفراغ التعبئة في جهاز التصفيح المدمج؛ و2.000 h/a.

الجدول (6-10): متطلبات القدرة والطاقة لعملية التصفيح بخلايا مربعة 15 cm.

نوع جهاز التصفيح	الطول × العرض (cm)	القدرة (kW)	الدورة (min)	عدد المنظومات لكل دورة	النتاج (منظومة / سنة)	النتاج سنة/MW_p	استهلاك الطاقة الكهربائية (kWh/ kW_p)
SPI 460	200 137 x	16.5	33	2	7200	0.622	16.23
SPI 460 سريع النضوج	200 137 x	16.5	15	2	15840	13.68	13.37
ICOLAM II	150 x 80	30.0	10	1	12000	1.0370	46.30
Solarwerk	230 150 x	20.0	33	3	10800	0.933	13.12
Solarwerk، سريع النضوج	230 150 x	20.0	15	3	23760	2.053	10.80

نوع المنظومة: 800 ـ PL، ومقاس المنظومة: 146.4 cm x 2.67 cm، والقدرة: $86.4\ W_p$؛ و3 دقائق للتعبئة وإفراغ التعبئة في جهاز التصفيح المدمج؛ و2.000 h/a، واستخدام الماء يساوي كما في الجدول (6-9).

6-5-2 إنتاج المنظومات الفولتضوئية «المغلَّفة»

تتكون المنظومة الفولتضوئية «المغلَّفة» من التركيب الآتي:

لوح زجاجي ـ بلاستيك ـ مصفوفة خلايا شمسية ـ بلاستيك ـ لوح زجاجي

في أغلب الأحيان، يُستخدم أسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين (EVA) كطبقة بلاستيكية، والتي تعمل على التثبيت المحكّم للألواح الزجاجية ومصفوفة الخلايا. لمنع تكوّن فقاعات هواء في التصفيح، يُستخدم جهاز تصفيح مفرَّغ لضغط التركيب في أثناء عملية التصفيح عند درجة حرارة $145\ ^oC$ إلى $200\ ^oC$. والبوليمر المشترك EVA، المتوافر على شكل رقائق بسماكة 0.5 mm إلى 0.7 mm، «ينضج» في أثناء التصفيح ما يجعل عملية تصفيحه غير قابل للانعكاس. ولمنع البلاستيك من الانحلال بواسطة الأشعة فوق البنفسجية («الاصفرار» أو «التحول إلى اللون البنّي»)، يتم إضافة مادة ماصة للأشعة فوق البنفسجية إلى أسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين. وتتكون الألواح الزجاجية من زجاج معالج حرارياً وخالٍ من الحديد («أبيض») بسماكة 2 mm إلى 3 mm.

يتطلب هذا النوع من إنتاج المنظومة، لنموذج الحالة الأول، استهلاك طاقة كهربائية قدرها 81 kWh لكل m^2 من مساحة الخلية، واستهلاك 80 kWh لكل m^2 من الوقود القابل للاحتراق، واستهلاك 20 kWh لكل m^2 من الوقود غير الطاقي. ولنموذج الحالة الثاني، يتطلب استهلاك طاقة كهربائية قدرها 36 kWh لكل m^2 من مساحة الخلية، واستهلاك 64 kWh لكل m^2 من الوقود القابل للاحتراق، واستهلاك 13 kWh لكل m^2 من الوقود غير الطاقي. يبيّن الجدول (أ ـ 5) في ملحق القيم الدقيقة لمختلف المكونات.

6-5-3 إنتاج المنظومات الفولتضوئية «المصفحة»

تتكون المنظومة الفولتضوئية «المصفحة» من التركيب الآتي:

لوح زجاجي ـ بلاستيك ـ مصفوفة خلايا شمسية ـ بلاستيك ـ لوح زجاجي

الجدول (6-11): استهلاك الطاقة المتراكِمة لإنتاج المنظومات الفولتضوئية.

النوع	إنتاج الرقاقة (kWh/m^2)	إنتاج الخلية (kWh/m^2)	إنتاج التصفيح (kWh/m^2)	تشكيل إطار المنظومة (kWh/m^2)	التسخين، وضوء المصنع (kWh/m^2)	إجمالي الطاقة (kWh/m^2)	المرجع
منظومة أحادية البلورة	780	26	55	215	-	1076 (1 861	Aulich [et al.] 1986
	470	126 (أ) 110 (ب)	57	0	-	653 637	Hagedorn, 1989a
	-	24	57	0	46	-	Palz [et al.], 1991
		344 (أ) 153 (ب)					Hagedorn, 1989
	200	26	55	215	-	496 (1 281	Aulich [et al.], 1986
	220	24	57	0	46	347	Palz [et al.], 1991
	220 (أ) 215 (ب)	126 (أ) 110 (ب)	47	0	ضمني ضمني	393 (أ) 372 (ب)	Hagedorn, 1989a
		328 (أ) 133 (ب)					Hagedorn, 1989
منظومة مغلّفة				181 (أ) 113 (ب)			
منظومة مصفحة				55			

1) من دون إطار.

(أ) الحالة الأولى: $2\ MW_p/a$، بنوبة تشغيل واحدة.

(ب) الحالة الثانية: $27\ MW_p/a$، بأربعة نوبات تشغيل.

في أغلب الأحيان، يُستخدم أسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين (EVA) كطبقة بلاستيكية. وعلى العكس من المنظومة المغلفة، الجزء الخلفي للمنظومة المصفحة لا يحتوي على لوح زجاجي، بل على مركب رقائقي من التيدلر ـ البوليستر ـ التيدلر أو التيدلر ـ الألمنيوم ـ التيدلر بسماكة 0.5 mm. ومتطلبات الطاقة المكافئة مبيّنة في الجدول (6–11). يفترض (Aulich [et. al.], 1986) طاقة قدرها $27\ kWh/m^2$ للزجاج المقوَّى الخالي من الحديد (بسماكة 3 إلى 4 mm)، و$23\ kWh/m^2$ للبلاستيك، و$5\ kWh/m^2$ لعملية التصفيح. ويبيّن الجدول (أ ـ 5) في الملحق ملخصاً شاملاً لقيم استهلاك الطاقة لمختلف المواد.

6–5–4 تكييف القدرة الكهربائية

لتهيئة التيار والجهد الناتجين من المولد الفولتضوئي بحسب متطلبات الحِمل، قد تكون هناك ضرورة لاستخدام نوع مختلف من المحولات اعتماداً على نوع النظام. للنظام المستقل، يتطلب استخدام جهاز تحكم بالشحن، ومنع التفريغ العميق، والتخزين الكهروكيميائي. ويُستحسن أيضاً استخدام متعقِّب لنقطة القدرة القصوى (MPPT) للتهيئة المثلى للحِمل بحسب الخصائص الفعلية للتيار والجهد للمولد الفولتضوئي، ومحول (عاكس) AC يسمح باستخدام أحمال AC.

الأنظمة الفولتضوئية المستخدمة لحقن الشبكة الكهربائية تحتاج إلى عاكس قادر على مزامنة الشبكة، ويُستحسن أيضاً استخدام متعقِّب لنقطة القدرة القصوى. وفي أغلب الأحيان، يتم دمج هذين الجهازين مع بعضهما. يبيّن الجدول (6–12) متطلبات الطاقة لهذه الوحدات، بما في ذلك توصيل الأسلاك، لمختلف أحجام محطات

القدرة الكهربائية. ويبيّن الجدول (أ ـ 16) في الملحق قائمة مفصلة بجميع المواد الداخلة في مكونات تكييف القدرة الكهربائية. كما يبيّن الجدول (أ ـ 18) في الملحق مكونات توليد القدرة الكهربائية والانبعاثات المحددة للدولة المنتجة لبعض المواد الخام.

الجدول (6-12): استهلاك الطاقة الأساسية المتراكِمة لمكونات حقن الشبكة الكهربائية.

نوع النظام الفولتضوئي	نوع الخلية	الربط، وتوصيل الأسلاك... إلخ (kWh/kW_p)	العاكس (kWh/kW_p)	المرجع
محطة قدرة ذات حجم كبير (1500 kW_p)	sc-Si	110	176	Hagedorn 1989
	a-Si	146	176	Hagedorn 1989
محطة قدرة ذات حجم صغير (300 kW_p)	sc-Si	525	352	Hagedorn 1989
	a-Si	755	352	Hagedorn 1989
نظام سقفي سكني (2.5 kW_p)	ـ	ـ	533 ـ 222	Johnson [et al.], 1997

sc-Si = سليكون أحادي البلورة a-Si = سليكون أمورفي القيمة الأقل المعطاة في Johnson [et al.], 1997 هي لإسهام إعادة التدوير 50 في المئة.

6-5-5 بنية الدعامة

لتركيب المنظومات الفولتضوئية بإحكام في موقع التنصيب، يجب أن تكون القواعد والدعامات قادرة على مقاومة أقصى سرعة

رياح متوقعة خلال العمر الزمني للمنظومة. يبيّن الجدول (6-13) أنواع مختلفة من الدعامات ومتطلبات الطاقة المقابلة لها.

الجدول (6-13): استهلاك الطاقة المتراكِمة لبنية الدعامة الفولتضوئية.

نوع بنية الدعامة	فولاذ (kg/m²)	خرسانة (kg/m²)	متطلبات الطاقة (kWh(el)/m²)	المرجع
تركيب سقفي	< 10	0	< 75	(Bloss et al.) 1992 [Hagedorn et al.] 1992
	< 10	0	< 30	Winter [et. al.] (Winter [et al.]) 1986
مقياس صغير	13.3	67	100	Hagedorn [et. al.] 1992
			45	Winter [et. al.] 1986
مقياس كبير	24.6	115.2	170	Hagedorn [et. al.] 1992
			82	1986Winter [et. al.]
	$235\ kg/kW_p$	$1.896\ kg/kW_p$		(Muller [et al.]) 1997
متعقب ذو محورين	46.3	980	450	Hagedorn [et. al.] 1992
			205	Winter [et. al.] 1986
متعقب ذو محورين (إنتاج تسلسلي أمريكا)	26 ـ 14	حوالى 200	186	Hagedorn [et. al.] 1992
			90	Winter [et. al.] 1986

ملاحظة: قيم متطلبات الطاقة للأنظمة المتعقِّبة والنظام السقفي في 1992Hagedorn [et. al.] تم إيجادها استقرائياً.

6-6 التنصيب والتهيئة للتشغيل

يشمل متطلب الطاقة للتنصيب في موقع التنصيب (W_{setup}) متطلبات النقل لجميع المكونات والمعدات ($W_{transport}$)، ومتطلب الدعامة، شاملاً تجهيزات الأرضية والقاعدة (W_{mount}) ـ انظر أيضاً

الجدولين (6–13) و(6–14)، وأيضاً الفقد الناتج من التشغيل المعتاد الثانوي في أثناء الضبط والتعديل (W_{adjust}). بالإضافة إلى محطة القدرة الفولتضوئية نفسها، يجب أخذ استهلاك العاملين أيضاً، والمعدات، والمواد في الحسابات.

$$W_{setup} = \sum W_{transport} + \sum W_{mount} + \sum W_{adjust} \quad (12)$$

الجدول (6–14): استهلاك الطاقة المتراكِمة وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون للتشييد.

الأداة	استهلاك الطاقة المباشر (MJ/m^3)	إجمالي متطلبات الطاقة (MJ/m^3)	انبعاثات CO_2 المباشرة (kg/m^3)	إجمالي انبعاثات CO_2 (kg/m^3)
جرّارة مزنجرة	5.9	7.81	0.0107	0.5324
حفّار هيدروليكي	4.9	6.71	0.00938	0.4550

ملاحظة: القيم المتعلقة بالمادة المحفورة (Frischnecht [et. al.], 1996).

6–6–1 النقل

يجب نقل محطة القدرة نفسها، والعاملين، والمعدات إلى موقع التنصيب. متطلبات الطاقة لذلك معطاة في الجدول (6–3) وأيضاً الجدول (أ ـ 8) في الملحق.

6–6–2 التنصيب

لحساب استهلاك الطاقة الأساسية للتنصيب (W_{mount})، يجب الأخذ في الاعتبار الاحتياجات العادية للمواد، والمعدات، والطاقة. ويبيّن الجدولان (أ ـ 4) و(أ ـ 5) في الملحق البيانات المقابلة لها.

6-6-3 التهيئة للتشغيل

في أثناء مرحلة التعديل، والمعايرة، والفحص فإن المردود المنخفض للطاقة محتمل جداً. وفي بعض الأحيان يجب استبدال أو إضافة مكونات. هذه المتطلبات يُرمز إليها بالرمز W_{adjust}.

6-7 نفقات التشغيل

للتشغيل (W_{op})، بالإضافة إلى النفقات المباشرة مثل تنظيف سطح المنظومة (W_{clean}) والحفاظ على بنية الدعامة ($W_{maintain}$)، يجب أيضاً الأخذ بعين الاعتبار الإصلاحات غير المتوقعة مثل تلك الناتجة من ضربات البرق، أو الزلازل، أو التخريب المتعمد (W_{repair}). وفي بعض الأحيان، هناك احتمالية للتعويض أيضاً عن الاستخدام البديل للمساحة الأرضية المستخدمة، مثلاً من أجل الزراعة (W_{area}). وإذا تم تبديل مكونات المبنى التقليدي بواسطة التنصيب الفولتضوئي، مثلاً في حالة النظام الشمسي السقفي، يجب عندئذ استخدام قيمة سالبة كتكاليف مُدخَلة.

$$W_{op} = \sum W_{clean} + \sum W_{maintain} + \sum W_{repair} + \sum W_{area} \quad (13)$$

6-7-1 التنظيف

سيتراكم على السطح العلوي للمنظومة الأوساخ التي تبثها الرياح وغائط الطيور، ما تؤدي إلى خفض المردود؛ ولهذا من الضروري أن تكون هناك إجراءات مراقبة وتنظيف على الموقع. هذا سيوجد تكاليف إشراف (W_{test})، وعاملين، ونقل ($W_{transport}$)، وخدمات تنظيف ($W_{utilities}$)، وفي حالة عملية التنظيف المقنن، مثل أدوات الرش البخارية، إيصال الطاقة لتشغيلها ($W_{cl.process}$). عادة، الفترة العملية للتنظيف هي سنة واحدة.

$$W_{clean} = \sum W_{transport} + \sum W_{test} + \sum W_{cl.process} + \sum W_{utilities} \qquad (14)$$

6-7-2 الصيانة

يجب حماية بنية الدعامة من التآكل. وإذا استُخدِمت مواد غير قابلة للتآكل، يجب أيضاً استعمال المعالجة السطحية المتينة (مثل الورنيش) وإعادة التجديد على الموقع. هذا سيؤدي إلى تكاليف للعاملين، والنقل (الوصول والمغادرة) ($W_{transport}$)، والأدوات (W_{tools}). وإذا استُخدِم مخزن للبطاريات، يجب صيانة البطاريات أو حتى استبدالها ($W_{materials}$).

$$W_{maintain} = \sum W_{transport} + \sum W_{tools} + \sum W_{process} + \sum W_{materials} \qquad (15)$$

في حال تعطل المكونات يجب استبدالها في الموقع. في هذه الحالة، يجب الأخذ في الاعتبار نقل العاملين والمواد ($W_{transport}$)، وتقدير الضرر (W_{test})، والأدوات (W_{tools})، والمواد نفسها ($W_{materials}$)، واستهلاك الطاقة على الموقع ($W_{rep.process}$).

$$W_{repair} = \sum W_{transport} + \sum W_{test} + \sum W_{rep.process} + \sum W_{tools} + \sum W_{materials} \qquad (16)$$

6-7-3 استخدام الأرضية

يجب شراء أو استئجار المساحة المستخدمة لتشغيل محطة القدرة الكهربائية، تحت أيّ ظرف. وعند استخدام المساحة الزائدة في مجال مثل الزراعة، فإن التأثيرات الناتجة من التظليل يجب أن تؤخذ بالاعتبار في توازن إضافي للطاقة وثاني أكسيد الكربون (W_{area}). وفي معظم الحالات، المساحة المغطاة بواسطة المنظومة الفولتضوئية يمكن استخدامها كاملة (للتركيب السقفي)، أو حتى أن

بعض مكونات المبنى يمكن استبدالها بمكونات فولتضوئية (دمج الواجهة والسقف). ولتفادي الفقد في المردود عن طريق التظليل في مساحة البناء الكثيفة، يجب الاحتفاظ بأرضية إضافية أمام المصفوفة الفولتضوئية (من دون أيّ عوائق عليها).

6-8 تفكيك المنظومة

في نهاية العمر الزمني للمنظومة، يجب تفكيك التنصيب (W_{decons})، ونقله ($W_{transport}$)، والتخلص منه (W_{waste}) أو إعادة تدويره ($W_{recycle}$). وفي حال عدم استخدام الموقع لتنصيب جديد، يجب إعادة المكان كما كان عليه ($W_{reconssite}$).

$$W_{de} = \sum W_{deconst} + \sum W_{transport} + \sum W_{recons\,site} + \sum W_{recycle} + \sum W_{waste} \quad (17)$$

6-8-1 التفكيك

يشتمل التفكيك على نقل العاملين والأدوات إلى الموقع وضرورات الطاقة المباشرة. استخدم ليوين (Lewin, 1993) القيم نفسها كما للتنصيب. للتكاليف الإجمالية البالغة 7500 US$/$W_p$ للاستثمار يساهم التنصيب 4.6 في المئة. لاستخدام الطاقة الأساسية، يقدِّر ليوين 43 kWh/kW_p (وهو المقدار نفسه كما للتنصيب ناقصاً المواد المستخدمة). تبيّن الجداول من (6-12) إلى (6-14) وأيضاً الجدولين (أ ـ 4) و(أ ـ 5) في الملحق بيانات مختلف التشييدات والخدمات، إلاّ أن هذه القيم تعتمد على كل تشييد على حدة لكل محطة القدرة الفولتضوئية.

6-8-2 النقل

يشتمل النقل على النقل من موقع التنصيب إلى موقع إعادة

التدوير. في هذه الحالة، ستكون القيم الموجودة في الجدول (6-3) وأيضاً في الجدول (أ ـ 8) في الملحق ستكون مفيدة. يحسب ليوين طاقة قدرها 107 kWh/kW_p للنقل من موقع التنصيب. سيتم دراسة الكسب في الطاقة عن طريق إعادة التدوير في الفصول اللاحقة.

الفصل السابع

مردود الطاقة

في رسالة الدكتوراه (Krauter, 1993c)) تم تطوير نموذج شامل مجهَّز للقيام بحساب قيم الفقد الناتجة من التهيئة البصرية والحرارية الرديئة للعاكسات الكهربائية الشمسية لظروف التشغيل الحقيقية. ذلك النموذج، مع نمذجة معروفة جداً للأداء الكهربائي، استُخدِم كمقترح وأداة لإيجاد مردود الأنظمة الفولتضوئية بشكل دقيق قدر الإمكان.

وتم عمل النمذجة للنظام الفولتضوئي بحيث يؤخذ في الاعتبار جميع المعاملات التي كان لها تأثير أكبر من 1 في المئة على المردود الكهربائي (وبالتالي على الإنتاج المحدد لثاني أكسيد الكربون).

7-1 نموذج لإيجاد الإشعاعية الواصلة إلى الخلية

تم استنتاج مسار الإشعاعية القادمة من الشمس، خلال الغلاف الجوي للأرض وخلال آلية اللوح الشمسي لتحويل القدرة الفولتضوئية، إلى أن تصل فعلياً إلى الخلية.

7-1-1 موضع الشمس بالنسبة إلى سطح الأرض

إستخدمت الإصدارات السابقة للنموذج (Krauter, 1993c) و(Strauβ 1994) المعادلات المنشورة من قِبَل (Walraven 1978)، آخذة في الاعتبار تقارير المتابعة والتحسينات المنشورة من قِبَل (Archer 1980)، و(Wilkinson, 1983) ، و(Kambezidis 1990). هذه

النماذج لا تعمل في الأوضاع التي يكون فيها ارتفاع الشمس أكبر من 90º (الواقعة للمواقع بين مدار الجدي ومدار السرطان ـ بين 23.5º جنوب و23.5º شمال خط الاستواء). وقد تم استبدال هذه الأجزاء للمعادلات بمعادلات مكافئة معطاة في النموذج DIN 5043 الجزء 2. طبقاً للنموذج DIN 5034 الجزء 2، الموضع الفعلي للشمس، المحدد بزاوية ارتفاع الشمس γs وزاوية السمت للشمس αs (انظر الشكل (7–1))، يمكن حسابه على النحو الآتي:

$$\alpha_s = 180^\circ - \arccos\left[\sin(\gamma_s)\cdot\sin(\phi) - \frac{\sin(\delta)}{\cos(\gamma_s)\cdot\cos(\phi)}\right] \qquad (18)$$

و:

$$\gamma_s = \arcsin\big/\cos((12-t)\cdot 15^\circ)\cos(\phi)\cos(\delta) + \sin((12-t)\cdot 15^\circ)\sin(\delta)\big) \qquad (19)$$

و:

$$\delta = 0.3948 - 23.2559\cos\left(\frac{d\cdot 360^\circ}{365} + 9.1^\circ\right) - 0.3915\cos\left(\frac{2d\cdot 360^\circ}{365} + 5.4^\circ\right) - 0.1764\cos\left(\frac{3d\cdot 360^\circ}{365} + 26^\circ\right) \qquad (20)$$

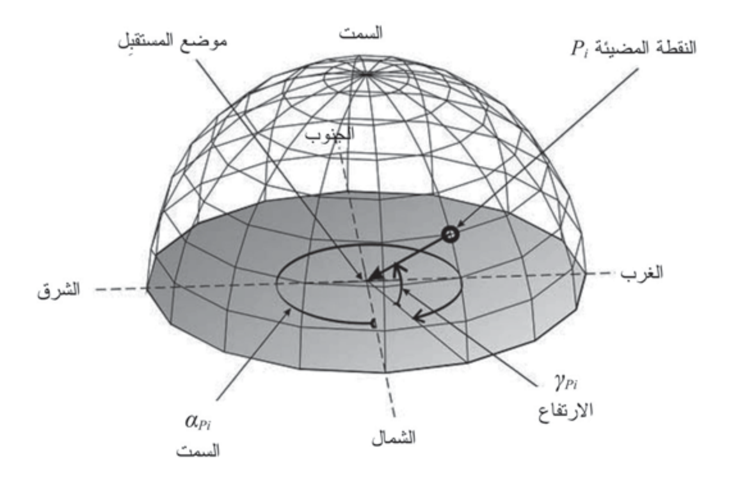
حيث:

d: عدد أيام السنة، بدءاً من $d = 1$ للأول من كانون الثاني/ يناير (لا توجد سنة كبيسة).

t: الزمن المحلي الشمسي (أعلى موضع للشمس عند الظهيرة، ونظام 24 ساعة).

ϕ: خط العرض (قيمة موجبة لمواقع شمال خط الاستواء، وسالبة لمواقع جنوب خط الاستواء).

δ: الميلان، موضع الشمس عند الظهيرة الشمسي (أعلى ارتفاع خلال اليوم) بالنسبة إلى خط الاستواء.



الشكل (7-1): تعريف زاوية الارتفاع γ_s وزاوية السمت α_S لنقطة مضيئة P_i (الشمس، مثلاً) طبقاً للنموذج DIN 5034 الجزء 2.

لقد تم تعديل المعادلات من أجل حساب خصائص الانكسار للغلاف الجوي، اعتماداً على ضغط ودرجة حرارة الجو، بالإضافة إلى تقوّس سطح الأرض. ويقترح التقويم الفلكي (Astronomical Almanac 1996) التصحيحات الآتية:

لزوايا ارتفاع الشمس $\gamma_s \geqslant 15^o$:

$$\Delta\gamma_s = \frac{0.00452^\circ \cdot p}{T_A \tan\gamma_s} \qquad (21)$$

ولزوايا ارتفاع الشمس $\gamma_s < 15^o$:

$$\Delta\gamma_s = \frac{\left(0.1594 + 0.0196\gamma_s + 0.00002\gamma_s^2\right)\cdot p}{\left(1 + 0.505\gamma_s + 0.0845\gamma_s^2\right)\cdot T_A} \qquad (22)$$

حيث:

$\Delta\gamma_s$: انحراف زاوية ارتفاع الشمس بسبب انكسار الغلاف الجوي (درجة زاويّة) (إضافة إلى زاوية الارتفاع الحقيقية للشمس γ_s).

γ_s: زاوية الارتفاع الحقيقية للشمس (درجة زاويّة).

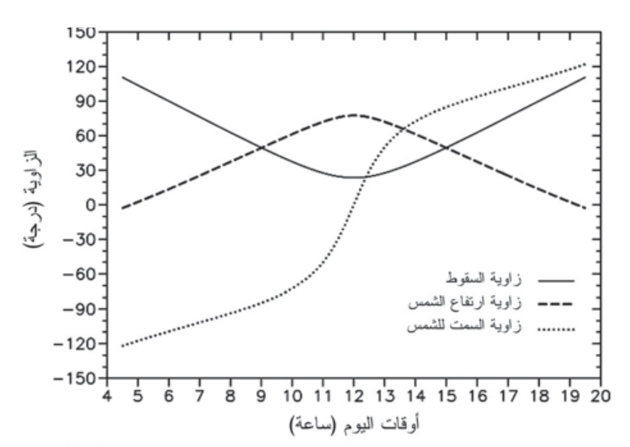
P: الضغط الجوي (mbar).

T_A: درجة حرارة الوسط المحيط (K).

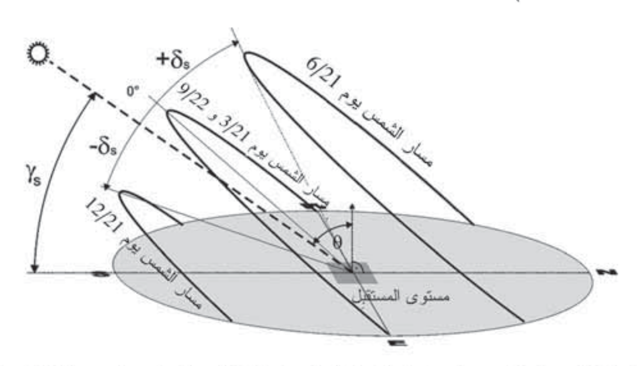
عند نقطة الانتقال، لزاوية الارتفاع 15º، تحدث فروق صغيرة فقط للدالتين والاشتقاقات، مما تُنتج مساراً ناعماً وثابتاً للدالة الكلِّية التي تأخذ في الاعتبار انكسار الغلاف الجوي. مقدار الدقة هي حوالى 0.0017º لزوايا ارتفاع للشمس $\gamma_s \geqslant 15º$. وزاوية السقوط θ_{in} على سطح المنظومة الفولتضوئية يتم إيجادها من خلال موضع الشمس (γ_S، α_S)، وزاوية ارتفاع المنظومة γ_m، وزاوية السمت للمنظومة α_M على النحو الآتي:

$$\theta_{in} = \arccos\left(\sin\gamma_S \cdot \cos\gamma_M - \cos\gamma_S \cdot \sin\gamma_M \cdot (\alpha_S - \alpha_M)\right) \qquad (23)$$

يبيّن الشكل (2-7) نتائج حسابات زاوية ارتفاع الشمس، وزاوية السمت للشمس، وزاوية السقوط على المنظومة الشمسية (زاوية ارتفاع المنظومة 36º، موجهة نحو الجنوب) خلال يوم صيفي (21 حزيران/ يونيو عند خط عرض 36º N).



الشكل (7-2): زاوية ارتفاع الشمس γ_s، وزاوية السمت للشمس α_S، وزاوية السقوط θ_{in} على سطح المنظومة خلال يوم صيفي (21 يونيو، خط عرض 36^o N، وزاوية ارتفاع المنظومة $\gamma_M = 36^o$ موجهة نحو الجنوب).



الشكل (7-3): مسار الشمس على نصف الكرة الشمالي في الاعتدالين الخريفي والربيعي (3/21 و 9/22)، والصيف (6/21)، والشتاء (21/12). ومبيّن أيضاً الانحرافات القصوى δ_S لنقاط منتصف اليوم وزاوية الارتفاع الفعلية للشمس γ_S مع زاوية السقوط θ_{in} على مستوى المستقبِل (Ertürk 1997).

7-1-2 مرور الإشعاعية الشمسية خلال الغلاف الجوي للأرض

7-1-2-1 الثابت الشمسي

فوق الغلاف الجوي للأرض مباشرة، تبلغ إشعاعية الشمس E_0 1.353 ± 7 W/m^2. هذه القيمة تسمى «الثابت الشمسي» (Solar Constant). المسافة من الأرض إلى الشمس لا تبقى ثابتة إطلاقاً،

بسبب المسار البيضاوي الطفيف، لهذا فإن الثابت الشمسي متفاوت قليلاً (أقل من 1 في المئة).

7-1-2-2 الإشعاعية الكلِّية

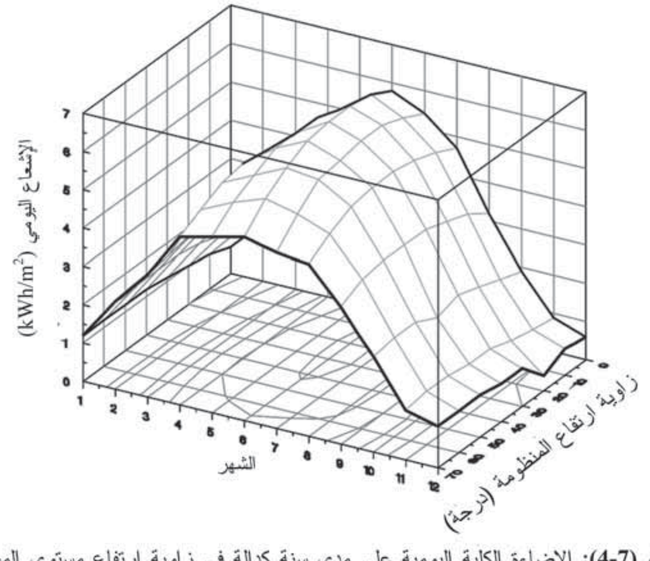
يمتص الغلاف الجوي للأرض ويشتت جزءاً من الإشعاعية الساقطة. يعتمد الامتصاص وأيضاً الاحتمال للتشتت على زاوية السقوط وعلى الطول الموجي للإشعاعية الشمسية. جزء التشتت لا يُفقَد كلياً، فجزء منها سيصل إلى سطح الأرض على هيئة ما يسمى بالإشعاعية الانتشارية. ومجموع الإشعاعية المباشرة والانتشارية يسمى الإشعاعية الكلِّية. يبيّن الجدول (7-1) قيم مرجعية للإشعاعية الكلِّية لظروف السماء الصافية كدالة في زاوية ارتفاع الشمس γs.

الجدول (7-1): الإشعاعية الكلِّية كدالة في زاوية ارتفاع الشمس γs (Holman 1990).

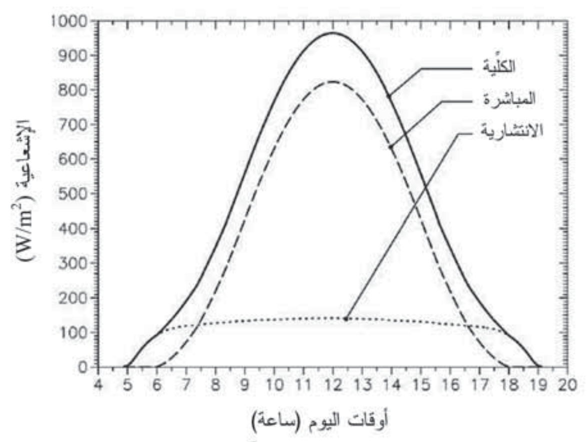
زاوية ارتفاع الشمس γs	الإشعاعية الكلِّية E_{glob} (W/m^2)
5^o	41.9
10^o	112.8
20^o	290.7
30^o	472.1
40^o	636.0
50^o	781.4
60^o	901.1
70^o	991.8
80^o	1043
90^o	1063

يبيّن الشكل (7-4) المجموع اليومي للإشعاعية الكلِّية على مدى سنة لاتجاهات مختلفة للمستقبِل، وللمنظومة الفولتضوئية، لموقع في وسط أوروبا (كريفيلد بألمانيا، 51ºN، 11.5ºE).

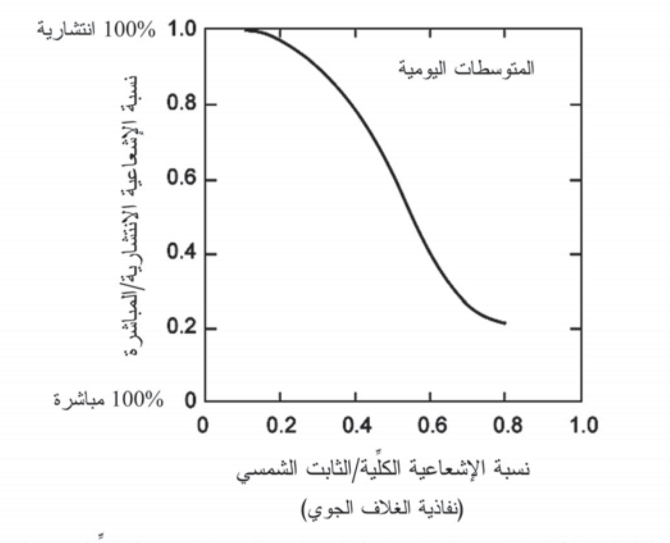
الجزآن المباشر والانتشاري للإشعاعية الكلِّية ليوم صاف مَبيّنان في الشكل (7–5). وإسهام الإشعاعية الانتشارية بالنسبة إلى الإشعاعية المباشرة كدالة في النسبة بين الإشعاعية الكلِّية إلى الثابت الشمسي (بمعنى آخر «صفاء» الغلاف الجوي) مبيّن في الشكل .(6–7)



الشكل (7-4): الإضاءة الكلية اليومية على مدى سنة كدالة في زاوية ارتفاع مستوى المستقبِل لموقع في وسط أوروبا (N °51، E °11.5) (بيانات (Schoedel)، 1993).



الشكل (7-5): الجزآن المباشر والانتشاري للإشعاعية الكلّية ليوم صاف 3/21 (و 9/22) لمستقبِل له زاوية الارتفاع نفسها كما لخط العرض (36°)، وبالتالي تسقط أشعة الشمس عمودياً عند الظهيرة.



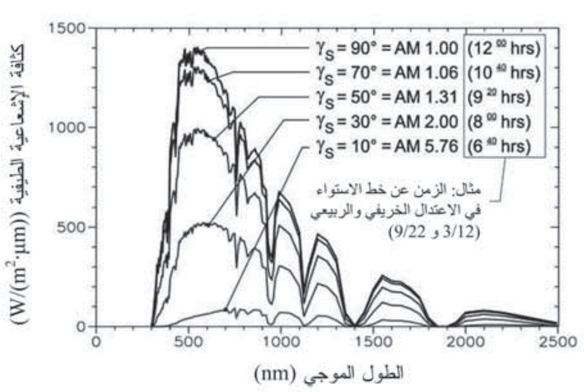
الشكل (7-6): الإشعاعية الانتشارية النسبية كدالة في الإشعاعية الكلّية النسبية.

7-1-2-3 الإشعاعية المباشرة

يتم إيجاد الإشعاعية المباشرة عن طريق موضع الشمس، والكتلة الهوائية، وظروف الغلاف الجوي (درجة الحرارة، والرطوبة، والسحب، ورذاذ الهواء)، وزاوية سقوط أشعة الشمس على مستوى المستقبِل (مثلاً، المنظومة الشمسية).

بصرف النظر عن تغيُّر الإشعاعية، تحدث تغيرات في التركيب الطيفي أيضاً، والتي تؤدي إلى تغيرات في كفاءة التحويل الفولتضوئي للمولد الشمسي بسبب حساسيته الانتقائية الطيفية. وقد أُجريت دراسات حول هذه التغيرات لأيام ولفصول السنة فقط حديثاً (Krauter, 1993c) . . . إلخ.

استُخدِمت النشرة الطيفية للجنة الدولية للاستضاءة (CIE) (Commission Internationale de l'Eclairage) رقم 85 (1990) كمرجع لتنفيذ النمذجة، لأنها أحدث تقدير تقريبي للظروف الحقيقية، كما إنها توفر بيانات لكتل هوائية مختلفة (انظر الشكل (7-7)) وعوامل تعكُّر مختلفة. وتم أيضاً تضمين أطياف لمختلف محتويات H_2O، وCO_2، وO_3.



الشكل (7-7): أطياف الإشعاعية الأرضية المباشرة للشمس (AM 5.6–AM 1) وفقاً لنشرة CIE رقم 85 (1990) للكتل الهوائية AM 1، و AM 2، و AM 5.6، وقيم أخرى عن طريق الاستيفاء.

7-1-2-4 الإشعاعية الانتشارية

للتطبيقات الأرضية، هناك دائماً جزء انتشاري كبير للإشعاعية الشمسية حتى لحالات السماء الصافية. وعلى مدى سنة، يبلغ الجزء الانتشاري بين 30 في المئة إلى 60 في المئة من الإشعاعية الكلّية. والتوزيع الفراغي في نصف الكرة السماوي للإشعاع الانتشاري أو المتشتت ليس متجانساً. ولأشعة الشمس غير المتشتتة، احتمال اصطدامها بجزيء أو رذاذ هوائي ومن ثم انعكاسها هو دالة في كثافة الهواء وسماكة الغلاف الجوي الذي مرت من خلاله. والجزء المنعكس نفسه دالة في زاوية السقوط ومعاملات الانكسار البصرية للأوساط المشاركة (قانون فرينِل (Fresnel)، انظر القسم 5-1-3-2). إضافة إلى ذلك، يجب الأخذ في الاعتبار تشتتات متعددة. النموذج المستخدم لدراسة الإشعاعية السماوية الزاويّة كدالة في موضع الشمس هو DIN 5034 الجزء 2 المبيّن أدناه. وأحد الأمثلة على توزيع استضاءة السماء عند زاوية ارتفاع الشمس $\gamma s = 30^{o}$ مبيّن في الشكل (7-8) كمنحنى كِفافي (كنتوري) (مسقط نصف الكرة السماوي على المستوى).

$$\frac{L_{eP}}{L_{eZ}} = \frac{\left[1-\exp\left(-\frac{0.32}{\cos\varepsilon}\right)\right]\left[0.856+16\exp\left(-\frac{3\eta}{rad}\right)+0.3\cos^2\eta\right]}{0.27385\left[0.856+16\exp\left(-3\left(\frac{\pi}{2}-\frac{\gamma_s}{rad}\right)\right)+0.3\cos^2\left(\frac{\pi}{2}-\frac{\gamma_s}{rad}\right)\right]} \quad (24)$$

و:

$$\frac{E_{eH}}{L_{eZ}} = 7.6752+6.1096\times10^{-2}\gamma_s-5.9344\times10^{-4}\gamma_s^2-1.6018\times10^{-4}\gamma_s^3 +3.8082\times10^{-6}\gamma_s^4-3.3126\times10^{-8}\gamma_s^5+1.0343\times10^{-10}\gamma_s^6 \quad (25)$$

و:

$$E_{eH} = 0.5\,E_{e0}\sin\gamma_s\cdot\left(\tau_a^m-\exp\left(-T_L\,\overline{\delta}_R\,m\,\frac{p}{p_0}\right)\right) \quad (26)$$

و :

$$\tau_a^m = \left(0.506 - 1.0788 \times 10^{-2} T_L\right)\left(1.294 + 2.4417 \times 10^{-2} \gamma_s - 3.973 \times 10^{-4} \gamma_s^2 + 3.8034 \times 10^{-6} \gamma_s^3 - 2.2145 \times 10^{-8} \gamma_s^4 + 5.8332 \times 10^{-11} \gamma_s^5\right) \quad (27)$$

و :

$$\delta_R \cdot m = \frac{1}{0.9 + 9.4 \sin \gamma_s} \quad (28)$$

حيث :

L_{eP} : استضاءة النقطة P في نصف الكرة السماوي.

L_{eZ} : استضاءة السمت.

T_L : عامل التعكُّر (دالة لحالة الغلاف الجوي).

ϵ : الزاوية بين السمت والنقطة P (درجة زاويّة).

η : الزاوية بين الشمس والنقطة P (درجة زاويّة).

$\eta = \text{arcoss}\ (\sin\gamma_S + \cos \epsilon + \cos \gamma_S \sin \epsilon \cos (\alpha_S - \alpha_p))$

T_L : عامل التعكُّر (دالة لحالة الغلاف الجوي).

γ_S : زاوية ارتفاع الشمس (درجة زاويّة).

α_s : زاوية السمت للشمس (درجة زاويّة).

α_p : زاوية السمت للنقطة P (درجة زاويّة).

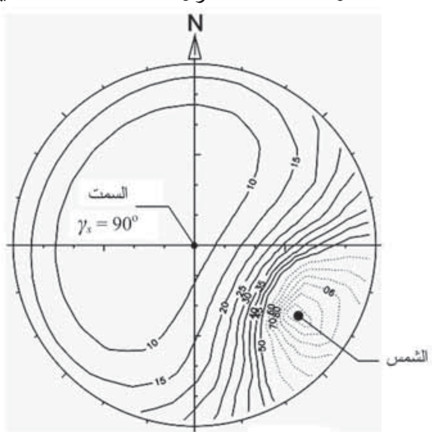
$\delta_R.m$: حاصل ضرب متوسط الكثافة البصرية (لغلاف جوي صاف وجاف لـ(Rayleigh) والكتلة الهوائية البصرية النسبية m.

يوضح الجدول (7-2) أمثلة على المتوسط الشهري لعوامل التعكُّر T_L في ألمانيا.

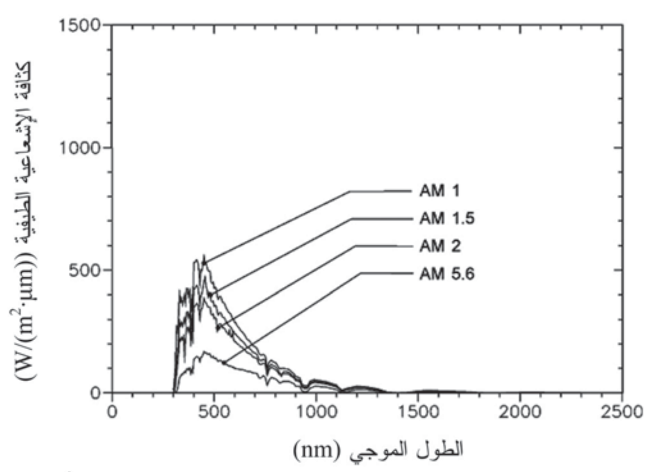
الجدول (7-2): المتوسط الشهري لعوامل التعكُّر T_L في ألمانيا (DIN 5034 الجزء 2).

الشهر	المتوسط الشهري لعامل التعكُّر T_L		
	الأعلى	المتوسط	الأقل
كانون الثاني/ يناير	4.80	3.8 ± 1.0	3.20
شباط/ فبراير	4.60	4.2 ± 1.1	3.60
آذار/ مارس	5.40	4.8 ± 1.5	4.30
نيسان/ أبريل	5.70	5.2 ± 1.8	4.80
أيار/ مايو	5.80	5.4 ± 1.7	4.90
حزيران/ يونيو	7.40	6.4 ± 1.9	5.60
تموز/ يوليو	6.90	6.3 ± 2.0	5.70
آب/ أغسطس	6.90	6.1 ± 1.9	5.70
أيلول/ سبتمبر	6.00	5.5 ± 1.6	5.20
تشرين الأول/ أكتوبر	4.90	4.3 ± 1.3	4.00
تشرين الثاني/ نوفمبر	4.20	3.7 ± 0.8	3.30
كانون الأول/ ديسمبر	4.10	3.6 ± 0.9	3.30
المتوسط السنوي	5.40	4.9 ± 1.5	4.70

تستند النمذجة الطيفية للإشعاعية الانتشارية إلى نشرة CIE رقم 85 (1990)، بشكل مناظر لنمذجة الجزء المباشر للإشعاعية. يبيّن الشكل (7-8) أطياف الإشعاعية الانتشارية للكتل الهوائية AM 1، وAM 1.5، وAM 2، وAM 5.6 لظروف السماء الصافية.



الشكل (7-8): توزيع الاستضاءة $L_P\ (\gamma_P،\alpha_P)$ بوحدة $W{\cdot}m^{-2}{\cdot}sr^{-1}$ في نصف الكرة السماوي طبقاً للنموذج DIN 5034 الجزء 2 ($\alpha_S=120^o$؛ $\gamma_S=30^o$؛ والسمت في المركز؛ والشمال نحو الأعلى).



الشكل (7-9): أطياف الإشعاعية الانتشارية لكتل هوائية مختلفة (AM) وفقاً لنشرة CIE رقم 85 (1990).

7-1-2-5 البياض

البياض (Albedo) هو جزء الأشعة الواصلة إلى الأرض التي يمكن أن تنعكس نحو المستقبِل. ويعتمد البياض كثيراً على خصائص سطح الأرض وزاوية السقوط. وحيث إنه من الصعب جداً حساب البياض، فإن البياض لا يؤخذ في الحسابات، ما لم يُذكر غير ذلك. لمزيد من الحسابات، يبيّن الجدول (7-3) بعض البيانات عن القيم النسبية للبياض.

الجدول (7-3): البياض لأسطح أرضية المختلفة (وفقاً لـ Holman, 1990).

سطح الأرض	البياض
تربة معتمة (رطبة)	08.0
تربة معتمة (جافة)	0.14
أرضية رمادية (جافة)	0.30 ـ 0.25
أرضية رمادية (رطبة)	0.12 ـ 0.10
رمل أصفر	0.35
رمل أبيض	0.40 ـ 0.34

الصخرة	0.12 ـ 0.15
العشب	0.26
حقل الأرز	0.12
غابة السنديان	0.18
الماء	0.03 ـ 0.40
الثلج	0.40 ـ 0.85

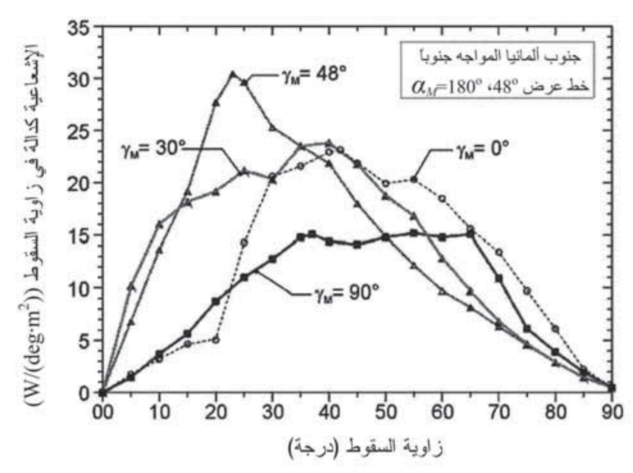
7-1-2-6 التوزيع الزاوي للإشعاعية السنوية في وسط أوروبا

تستخدم المشاهدات المبيّنة أعلاه السماء الصافية كشرط أساسي. في الواقع، السماء في العديد من المواقع (مثل وسط أوروبا) تكون في أغلب الأحيان مغطاة بالسحب. حسابات التوزيع الزاوي للإشعاعية لمدينة ريببرج بألمانيا (48ºN)، استناداً إلى التوزيع الانتشاري ـ المباشر لما يسمى بـ «السنة الأرصادية النموذجية» (Typical Meteorological Year (TMY)) باستخدام بياض قدره 0.2، أُجريَت بواسطة (Preu [et al.] 1995). ويبيّن الشكل (7-10) الإشعاعية الكلِّية كدالة في زاوية السقوط لاتجاهات مختلفة للمنظومة الفولتضوئية (أفقياً ومميلة جنوباً بزوايا ارتفاع للمنظومة 30º، 48º، 90º). ولجميع زوايا السقوط غير الصفر، المدى الزاوي المفترَض للإشعاعية المتراكِمة كان درجة واحدة. ولزاوية السقوط 0º تماماً، استُخدِمت القيمة صفر لأن المدى الزاوي المفترَض متناهي في الصغر وهو كذلك للإشعاعية المتراكِمة.

7-1-3 النموذج البصري لتغليف المنظومة

النموذج البصري المشروح هنا صحيح رياضياً للشرائح الأسمك من الطول الموجي للإشعاعية، وجميع الانعكاسات الداخلية والخارجية المحتملة سيتم دراستها. ويمكن تطبيق النموذج لأيّ نوع من الأنظمة البصرية التي تتكون من عدد من الشرائح المستوية المتجانسة المختلفة المحددة بمعاملات انكسارها، ومعاملات

امتصاصها، وسماكتها. ومتضمَّن التشتت البصري ومعاملات الانكسار المركَّبة أيضاً. والسماكة يمكن أن تتفاوت ما بين ما لانهاية إلى حدود الطول الموجي للإشعاعية. ولحساب أداء الانعكاس الشمسي لنظام بصري خلال النهار، تم تنفيذ نموذج إشعاعي مع الأخذ بعين الاعتبار التوزيع الفراغي للإشعاعية الانتشارية والمباشرة لظروف السماء الصافية.

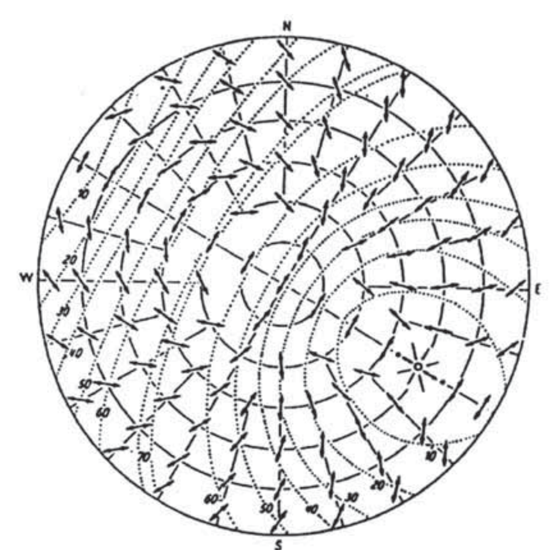


الشكل (7-10): الإشعاعية كدالة في زاوية السقوط لزوايا ارتفاع مختلفة γ_M للمنظومة الفولتضوئية في مدينة فريبيرج بألمانيا (48° N)، وفقاً لـ (Prev [et. al.] 1995).

الفقد بالانعكاس تحت الظروف الحقيقية

في الأبحاث المنشورة السابقة، تقديرات الفقد بالانعكاس من سطح المنظومات الفولتضوئية استندت إلى السقوط الرأسي وقُدّرت بمقدار 2 في المئة إلى 4 في المئة من الإشعاعية الساقطة. وهذا صحيح للأنظمة المتعقِّبة فقط من دون أيّ أجزاء انتشارية للإشعاع الشمسي (كما في الفضاء). في الأنظمة الأرضية غير المتعقّبة، يسقط الإشعاع الشمسي المباشر مرتان فقط في السنة رأسياً تماماً على سطح المنظومة. وفي أحيان أخرى، يزداد الجزء المنعكس وفقاً لقانون

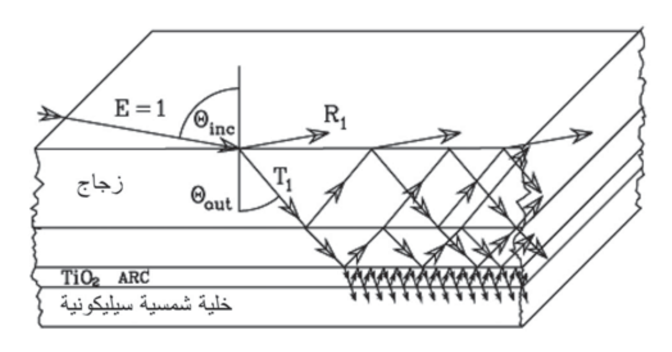
Fresnel (انظر أدناه). وللتطبيق الأرضي، هناك دائماً جزء انتشاري للإشعاع الشمسي (حتى في الأيام الصافية جداً) يبلغ متوسط قيمته خلال السنة بين 30 في المئة إلى 60 في المئة من الإشعاع الكلّي (اعتماداً على الظروف الجغرافية). يوضح الشكل (7–11) مثالاً على توزيع الاستقطاب للإشعاع الانتشاري في نصف الكرة السماوي. هذا الإشعاع الانتشاري متباين في الخواص، وتم تبنّي النموذج المستخدم في ما بعد من DIN 5034، والنموذج الأكثر تقدّماً المقترح من (Perez [et al.]) 1993 سيتم تنفيذه مستقبلاً.



الشكل (7-11): نموذج استقطاب لنصف الكرة السماوي ليوم صاف ولزاوية ارتفاع للشمس 30^{o} (فون فريش (von Frisch)، 1965).

لتحقيق صورة دقيقة للظروف البصرية الحقيقية في المنظومة، تم تطوير نموذج لتغليف الخلية يقوم باستنتاج الإشعاع الواصل إلى الخلية من الشمس والإشعاعية السماوية أيضاً. وقد تم تنفيذ ذلك من خلال نمذجة العمليات البصرية (الانعكاس، والامتصاص) الحادثة خارج

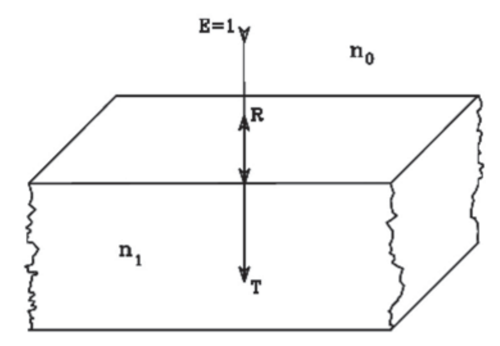
وداخل التغليف (انظر أيضاً الشكل (7–12)). وبما أن الإشعاعية الانتشارية تتشتت، فقد تم استقطابها أيضاً. لهذا، فإن الانعكاسية التي تعتمد على تأثير الاستقطاب تم التفكير بها في الأبحاث السابقة (Krauter [et. al], 1991، وKrauter, 1993): الفقد بالانعكاس زاد بمقدار 0.5 في المئة إلى 5 في المئة فوق الجزء الانتشاري بسبب الاستقطاب. والمقدار الكلّي للفقد بالانعكاس على مدى سنة هو في حدود 20 في المئة (Krauter [et. al], 1994، وKrauter and Hanitsch, 1996). يقدم انخفاض الفقد بالانعكاس لتحسين نفاذية طبقات تغليف المنظومة الفولتضوئية إسهاماً مهماً لرفع كفاءة الأنظمة الفولتضوئية.



الشكل (7-12): مسار الأشعة خلال المنظومة الفولتضوئية المغلّفة.

7–1–3–1 السطح البصري البيني عند الحد الفاصل للطبقات

السقوط الرأسي للشعاع: عند الانتقال من وسط إلى آخر عندما يدخل الشعاع من مادة ذات كثافة بصرية (n_0) إلى مادة أخرى ذات كثافة بصرية (n_1)، ينقسم الشعاع إلى جزء منعكس (R) وجزء نافذ (T) عند السطح البصري البيني، انظر الشكل (7–13) في حالة السقوط الرأسي للشعاع.



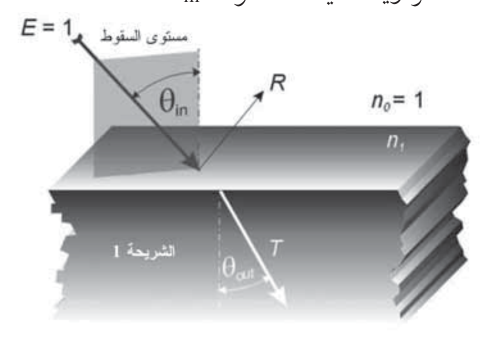
الشكل (7-13): السقوط العمودي للشعاع على سطح مستوي (θ_{in}).

تسمى R أيضاً بـ «الانعكاسية»، وتسمى T بـ «النفاذية» (انظر مثلاً (Dietz) 1991). والإشعاعية (E) للشعاع الخارج تُعايَر (normalized) إلى $E = 1$:

$$R = \frac{(n_1 - n_0)^2}{(n_0 + n_1)^2} \quad (29)$$

$$T = 1 - R \quad (30)$$

السقوط غير الرأسي للإشعاع: الوضع الواقعي الأكثر هو حالة السقوط غير الرأسي للإشعاع الشمسي (انظر الشكل (7-14)). هنا، يمكن حساب الانعكاسية بواسطة معادلة Fresnel (انظر مثلاً Born and Wolf, 1975) لزاوية معيّنة للسقوط θ_{in}.



الشكل (7-14): النفاذية والانعكاسية عند الحد الفاصل للسقوط غير الرأسي للشعاع ($\theta_{in} \neq 0^o$).

مركِّبتا الاتجاه للاستقطاب الموازي (||) أو الرأسي (⊥) لزاوية السقوط يجب أن يتم حسابهما بشكل منفصل عن بعضهما. والانعكاسات المعايَرة ($R_{||}$ و $R_{\perp}$) تعطى على النحو الآتي (بإهمال الجزء التخيلي لمعامل الانكسار المركَّب):

$$R_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_{in} - \theta_{out})}{\tan^2(\theta_{in} + \theta_{out})} \qquad R_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_{in} - \theta_{out})}{\sin^2(\theta_{in} + \theta_{out})} \tag{31}$$

والنفاذية تعطى على النحو الآتي:

$$T_{\parallel} = 1 - R_{\parallel} \qquad T_{\perp} = 1 - R_{\perp} \tag{32}$$

حيث زاوية الانكسار θ_{out} هي:

$$\theta_{out} = \arcsin\left(\frac{n_0}{n_1}\sin\theta_{in}\right) \tag{33}$$

معاملات الانكسار المركَّبة: لمواد وأطوال موجية معيّنة، الجزء التخيلي k لمعامل الانكسار المركَّب يجب عدم إهماله (في حالتنا في السليكون فقط للطول الموجي). وهذا يمكن إجراؤه بواسطة معادلة مقترحة من (Azzam and Bashara 1987)، على النحو الآتي:

للسقوط الرأسي للشعاع: $(R_0 = r_{\parallel} r_{\parallel}^* = r_{\perp} r_{\perp}^*)$

$$R_0 = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \tag{34}$$

وللسقوط غير الرأسي للشعاع:

$$R_{\parallel} = r_{\parallel} r_{\parallel}^* = \frac{\mu + |\varepsilon|^2 x^2 - x(\mu + y^2)\sqrt{2(\mu + \kappa)}}{\mu + |\varepsilon|^2 x^2 + x(\mu + y^2)\sqrt{2(\mu + \kappa)}} \tag{35}$$

و:

$$R_{\perp} = r_{\perp} r_{\perp}^{*} = \frac{\mu + x^2 - x\sqrt{2(\mu+\kappa)}}{\mu + x^2 + x\sqrt{2(\mu+\kappa)}} \quad (36)$$

$$\mu^2 = \left(\varepsilon - y^2\right)\left(\varepsilon^* - y^2\right) = |\varepsilon|^2 - 2\varepsilon_1 y^2 + y^4 \,,$$

$$\varepsilon_1 = n^2 - k^2 \,,$$

$$\varepsilon_2 = 2nk \,,$$

$$|\varepsilon|^2 = \varepsilon\varepsilon^* = \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 = \left(n^2 + k^2\right)^2 ,$$

$$\kappa = \varepsilon_1 - y^2 \,,$$

$$x = \cos(\theta_{in}) \,,$$

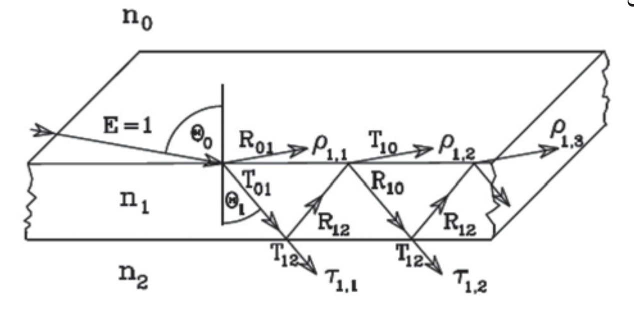
$$y = \sin(\theta_{in})$$

حيث:

الرموز κ، x، y، μ^2 ليست سوى متغيرات رياضية ومن دون أيّ خلفية فيزيائية محددة لها.

7-1-3-2 النفاذية البصرية لشريحة مستوية

الإشعاع الشمسي الساقط يجب أن يمر خلال الحد البصري الفاصل بين طبقتين، ويحدث التوهين بواسطة الامتصاص في داخل المادة. والانعكاس الحادث عند الحد الفاصل السفلي لا يُفقَد كلّياً، بل يرتد نحو الأعلى خلال الشريحة مع تناقص في الشدة (انظر الشكل (7-15)).



الشكل (7-15): النفاذية خلال شريحة بصرية مستوية.

لتكوين تسمية عامة، سنرمز لأيّ طبقة بالمعامل «k»، وللوسط العلوي بالمعامل «$k-1$»، وللوسط السفلي بالمعامل «$k+1$». زاوية السقوط للانتقال من الوسط «$k-1$» إلى الوسط «k» يشار إليها بالرمز θ_k، وزاوية الانكسار بالرمز θ_{k+1}. ويشار إلى الانتقالات البصرية بمعاملات الأوساط بحسب ترتيب الشعاع المار خلالها k، $k \pm 1$ (مثلاً T_{01}). والأجزاء النافذة i للإشعاعية على الشريحة k يُرمز لها بالرمز $\rho_{k,i}$، والمنعكسة بالرمز $\tau_{k,i}$. ولم يتم إجراء تمييز بين مستويات الاستقطاب وذلك للحفاظ على المعادلات بصورة مبسّطة. بالتالي، للمتغيرات R وT المستخدمة بشكل عام، سيتم إدراج المركِّبات المحددة $R_{||}$، $R_{\perp}$ و$T_{||}$ و$T_{\perp}$. وسيتم أيضاً تعايُر الإشعاعية الساقطة إلى. والتوهين الامتصاصي للشعاع بعد مروره خلال الشريحة 1، على سبيل المثال، يتم إيجاده بواسطة معامل الامتصاص للمادة، وسماكة الشريحة d_1، وزاوية السقوط θ_1 على الشريحة المعنية 1، أي إن:

$$\frac{\Delta E_1}{E_1} = \exp\left(-\alpha_1 \frac{d_1}{\cos\theta_1}\right) \tag{37}$$

وإذا كان الجزء التخيلي لمعامل الانكسار المركَّب

$\hat{n} = n - \mathrm{j}k$ معلوماً، يمكن أيضاً حساب معامل الامتصاص α للمادة من العلاقة $\alpha(\lambda) = 4\pi k \lambda^{-1}$.

لهذا، يحدث الانعكاس الخارجي R_{01} عند الحد الفاصل لسطح السقوط للشريحة 1، ويحدث الانعكاس الداخلي R_{12} عند سطحها السفلي، بينما يتكون الجزء المتبقي النافذ من:

$$\tau_{11} = T_{01}\, T_{12} \exp\left(-\alpha_1 \frac{d_1}{\cos\theta_1}\right) \tag{38}$$

يتم حساب الانعكاس الداخلي R_{12} بطريقة الحساب نفسها R_{01}

باستخدام المعادلة (31) أيضاً، وزاوية السقوط الجديدة θ_2 للطبقة السفلية 2 باستخدام المعادلة (32). الانعكاس الداخلي عند الحد الفاصل 1 ـ 2 يمر خلال الطبقة 1 مرة أخرى، ويتم توهينه وفقاً لذلك. وعند الحد الفاصل 0 ـ 1، ينكسر هذا الشعاع مرة أخرى بينما الجزء T_{10} ينفذ إلى الوسط .0 ويصل الجزء المنعكس R_{10} إلى الحد الفاصل 1 ـ 2 متأثراً بتوهين، بينما ينفذ جزء آخر T_{12} إلى الطبقة .2 وبشكل عام:

$$\tau_{12} = T_{01}\, R_{12}\, R_{01}\, T_{12} \exp\left(\frac{-3\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right) \tag{39}$$

بجمع جميع أجزاء النفاذية للطبقة 1 نحصل على:

$$\tau_1 = T_{01}\, T_{12} \exp\left(\frac{-\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right) \sum_{i=1}^{\infty} \left[R_{12}\, R_{10} \exp\left(\frac{-2\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right)\right]^{i-1} \tag{40}$$

و:

$$\tau_{1,i} = T_{01}\, T_{12}\, R_{12}^{i-1}\, R_{10}^{i-1} \exp\left(\frac{-(2i-1)\,\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right) \tag{41}$$

هذه السلسلة اللانهائية هي متوالية هندسية ويمكن كتابتها بشكل مختصر كالآتي:

$$\tau_1 = \frac{T_{01}\, T_{12} \exp\left(\frac{-\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right)}{1 - R_{12}\, R_{10} \exp\left(\frac{-2\,\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right)} \tag{42}$$

بما أن الشعاع يتم امتصاصه في الشريحة، يجب حساب الانعكاسية 7 للشريحة بشكل ضمني، لأن. والأجزاء المنعكسة $_{i}7_1$, للشريحة 1 سيتم حسابها على النحو الآتي:

$$\rho_{1,1} = R_{01} \tag{43}$$

و:

$$\rho_{1,2} = T_{01} R_{12} T_{12} \exp\left(\frac{-2\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right) \tag{44}$$

و:

$$\rho_{1,3} = T_{01} R_{12}^2 R_{10} T_{10} \exp\left(\frac{-4\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right) \tag{45}$$

و:

$$\rho_{1,i>1} = T_{01} R_{12}^{i-1} R_{10}^{i-2} T_{10}\left[\exp\left(\frac{-2\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right)\right]^{i-1} \tag{46}$$

مجموع جميع الأجزاء المنعكسة ρ_1 للطبقة 1 هو:

$$\rho_1 = R_{01} + T_{01} R_{12} T_{10} \exp\left(\frac{-2\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right)\sum_{m=1}^{\infty}\left[R_{10} R_{12} \exp\left(\frac{-2\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right)\right]^{m-1} \tag{47}$$

هذه السلسلة اللانهائية هي متوالية هندسية مرة أخرى ويمكن كتابتها بشكل مختصر كالآتي:

$$\rho_1 = R_{01} + \frac{T_{01} R_{12} T_{10} \exp\left(\frac{-2\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right)}{1 - R_{10} R_{12} \exp\left(\frac{-2\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right)} \tag{48}$$

7-1-3-3 النفاذ والانعكاس الداخلي

معرفة النفاذية الداخلية للشعاع ضروري لإيجاد نفاذية أنظمة طبقية متعددة، على سبيل المثال، هي نفاذية الشريحة 1، عند إضاءتها من انعكاسات خارجة من الشريحة 2. لتمييز النفاذية والانعكاسية الداخلية عن النفاذية والانعكاسية الخارجية، تُستخدم شَرطة (ـ) فوق رمز المتغير.

$$\overline{\tau}_1 = T_{01} \exp\left(\frac{-\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right) \sum_{i=1}^{\infty} \left[R_{10}\, R_{12} \exp\left(\frac{-2\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right) \right]^{i-1} \tag{49}$$

أو :

$$\overline{\tau}_1 = \frac{T_{01} \exp\left(\frac{-\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right)}{1 - R_{10}\, R_{12} \exp\left(\frac{-2\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right)} \tag{50}$$

عند الحد الفاصل بين الشريحة 2 والشريحة 1 يتم إهمال T_{21} لأنه قد تم حسابها بواسطة صافي الانعكاسية للشرائح السفلية. ويتم وضع الانعكاسية الداخلية بنفس الطريقة كالآتي:

$$\overline{\rho}_1 = R_{10}\, T_{12} \exp\left(\frac{-2\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right) \sum_{i=1}^{\infty} \left[R_{12}\, R_{10} \exp\left(\frac{-2\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right) \right]^{i-1} \tag{51}$$

أو :

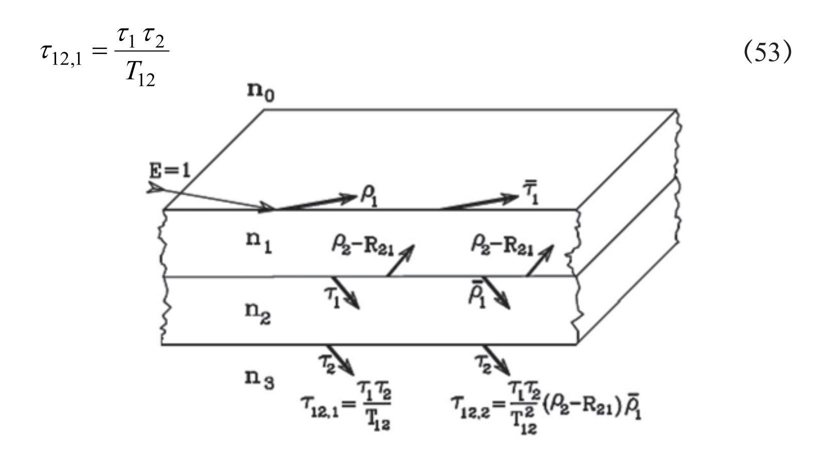
$$\overline{\rho}_1 = \frac{R_{10}\, T_{12} \exp\left(\frac{-2\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right)}{1 - R_{12}\, R_{10} \exp\left(\frac{-2\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right)} \tag{52}$$

تم أيضاً إهمال الانتقال (T_{21}) من الشريحة 2 إلى الشريحة 1.

7-1-3-4 النفاذية خلال شريحتين

سيتم الآن دراسة نظام بصري يتكون من الشريحة 1 والشريحة 2. بالإضافة إلى الانعكاسات الداخلية في داخل كل شريحة، هناك انعكاسات أيضاً على الشريحتين سيتم دراستها (بين الحد الفاصل العلوي لإحدى الشريحتين والحد الفاصل السفلي للشريحة السفلية). لتبسيط الصورة، تُجمع الأشعة وسلاسلها اللانهائية كنفاذيات τ وانعكاسيات $\overline{\rho}$. وهذا موضح في الشكل (7-16) بالأسهم الغامقة. والكسر في المعادلة الآتية يوضح الشعاع الداخل إلى الشريحة 3:

$$\tau_{12,1} = \frac{\tau_1 \tau_2}{T_{12}} \qquad (53)$$



الشكل (7-16): النفاذية لنظام بصري يتكون من شريحتين بصريتين.

تجدر الإشارة إلى أنه للتأليف المكوّن من النفاذيتين τ_1 وτ_2، تم حساب الانعكاس الحادث عند الحد الفاصل 1 ـ 2 في τ_1 وأيضاً في τ_2. وبالتالي، يجب استبدال τ_{12} مرة واحدة بالمتغير T_{12}. وفقاً لذلك، يجب عمل هذا الإجراء لأيّ تكوينات إضافية τ_{k+1} من الشرائح.

يدخل الجزء المنعكس $\tau_1\,(p_2\text{-}R_{21})\,T_{12}^{-1}$ من الطبقة الداخلية 2 الشريحة 1 ثم ينعكس عند الحد الفاصل 1 ـ 0 إلى الشريحة 1 بفقد τ_1. ومن الشريحة $\bar{\rho}_1$ يصل الجزء إلى الشريحة 2:

$$\bar{\rho}_1 = \frac{R_{10}\, T_{12} \exp\left(\dfrac{-2\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right)}{1 - R_{12}\, R_{10} \exp\left(\dfrac{-2\alpha_1 d_1}{\cos\theta_1}\right)} \qquad (54)$$

يمكن معاملة الجزء بالطريقة نفسها كما للجزء المباشر الساقط، وبهذا يكون له التوهين نفسه $(\tau_2\, T_{12}^{-1})$، كما لذلك في الشريحة 2 عند دخوله إلى الشريحة 3. وهذا يؤدي إلى:

$$\bar{\tau}_{12,2} = \frac{\tau_1(\rho_2 - R_{12})\bar{\rho}_1\, \bar{\tau}_2}{T_{12}^2} \qquad (55)$$

مرة أخرى، ينعكس الجزء $\tau_2 T_{12}^{-1}$ من الشريحة 2 إلى الشريحة 1. ويمكن كتابة النفاذية الكلِّية بشكل مختصر كالآتي:

$$\tau_{12} = \frac{\tau_1 \tau_2}{T_{12}} \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{(\rho_2 - R_{12})\overline{\rho}_1}{T_{12}} \right]^{i-1} \quad (56)$$

أو:

$$\tau_{12} = \frac{\tau_1 \tau_2}{T_{12} - (\rho_2 - R_{12})\overline{\rho}_1} \quad (57)$$

والانعكاسية الكلِّية P_{12} لنظام الشريحتين يمكن اشتقاقها وفقاً لذلك على النحو الآتي:

$$\rho_{12,1} = \rho_1 \quad (58)$$

$$\rho_{12,2} = \frac{\tau_1 (\rho_2 - R_{12})\overline{\tau}_1}{T_{12}} \quad (59)$$

$$\rho_{12,3} = \frac{\tau_1 (\rho_2 - R_{12})^2 \overline{\rho}_1 \overline{\tau}_1}{T_{12}^2} \quad (60)$$

$$\rho_{12} = \rho_1 + \frac{\tau_1 \overline{\tau}_1 (\rho_2 - R_{12})}{T_{12}} \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{(\rho_2 - R_{12})\overline{\rho}_1}{T_{12}} \right]^{i-1} \quad (61)$$

$$\rho_{12} = \rho_1 + \frac{\tau_1 \overline{\tau}_1 (\rho_2 - R_{12})}{T_{12} - (\rho_2 - R_{12})\overline{\rho}_1} \quad (62)$$

والانعكاس الداخلي لنظام الشريحتين هو:

$$\overline{\rho}_{21} = \overline{\rho}_2 + \frac{\overline{\tau}_2 \overline{\rho}_1 \tau_2}{T_{12}} \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{(\rho_2 - R_{12})\overline{\rho}_1}{T_{12}} \right]^{i-1} \quad (63)$$

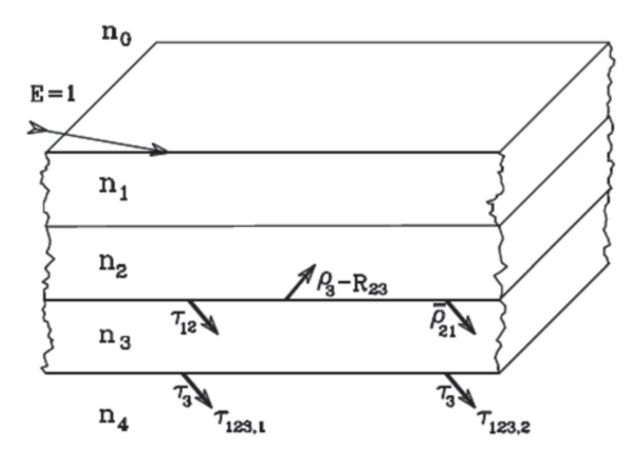
$$\rho_{21} = \overline{\rho}_2 + \frac{\overline{\tau}_2 \tau_2 \overline{\rho}_1}{T_{12} - \overline{\rho}_1 (\rho_2 - R_{12})} \quad (64)$$

وباستخدام المعادلة (50):

$$\bar{\tau}_2 = \frac{T_{21}\exp\left(\frac{-\alpha_2 d_2}{\cos\theta_2}\right)}{1 - R_{21}R_{23}\exp\left(\frac{-2\alpha_2 d_2}{\cos\theta_2}\right)} \tag{65}$$

7-1-3-5 النفاذية خلال ثلاث شرائح

يُعتبر تغليف المنظومة هنا كثلاث شرائح بخصائص بصرية مختلفة (انظر الشكل (7-17)). الشريحتان العلويتان 1 و2 تعتبران الآن كنظام يتصف بنفاذيته المشتركة وانعكاسيته المشتركة، مثلما حُسِب أعلاه في القسم السابق. وبالتالي فإن التفاعلات الداخلية، النفاذيات والانعكاسيات الداخلية، يجب أخذها في الاعتبار بين نظام الشريحة 21 والشريحة الجديدة 3 فقط.



الشكل (7-17): النفاذية لنظام بصري يتكون من ثلاث شرائح بصرية.

بعد انقسام الشعاع عند سطح المنظومة (أي الشريحة 1) إلى جزء منعكس وجزء نافذ، ينضم الجزء النافذ مع الأجزاء المنعكسة عند الحدود الفاصلة الداخلية بتوهين امتصاصي تجاه الطبقة الفاصلة للشريحة 2. وفقاً لذلك، سيكون هذا هو نفسه كما للشعاع النافذ للشريحتين 2 و3. لهذا، تُعتبر الشريحتان العلويتان 1 و2 الآن نظاماً

واحداً يتصف بنفاذيته المشتركة وانعكاسيته المشتركة. وللجزء الداخل إلى الشريحة 4 نحصل على النتيجة الآتية:

$$\tau_{123,1} = \frac{\tau_{12}\,\tau_3}{T_{23}} \tag{66}$$

عند الحد الفاصل 2 ـ 3، تمر الانعكاسات الداخلية من الشريحة 3 إلى حدود نظام الشريحة 21 (الانعكاس R_{23} قد تم حسابه في τ_2 ولهذا يتم طرحه). يمر جزء خلال نظام الشريحة 21، إلاّ أن جزءاً آخر سينعكس مرة أخرى ويصل إلى الشريحة 4 بعد مروره من الحد الفاصل 2 ـ 3 والشريحة 3:

$$\tau_{123,2} = \tau_{12} \cdot \frac{(\rho_3 - R_{23})}{T_{23}} \cdot \frac{\overline{\rho}_{21}\tau_3}{T_{23}} \tag{67}$$

مجموع جميع الأجزاء الواصلة إلى الوسط 4 هي:

$$\tau_{123} = \frac{\tau_{13}\,\tau_3}{T_{23}} \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{(\rho_3 - R_{23})\overline{\rho}_{21}}{T_{23}} \right]^{i-1} \tag{68}$$

$$\tau_{123} = \frac{\tau_{12}\,\tau_{13}}{T_{23} - (\rho_3 - R_{23})\overline{\rho}_{21}} \tag{69}$$

7-1-3-6 النفاذية خلال عدد m من الشرائح

تعتبر جميع الشرائح العلوية من 1 إلى (m-1) الآن نظاماً واحداً يتصف بنفاذيته المشتركة وانعكاسيته المشتركة، ويشار إلى جميع الشرائح بالرمز 1...m (بدلاً من: . . . 123 إلى m). وللجزء الداخل إلى الشريحة $(m+1)$ نحصل على النتيجة الآتية:

$$\tau_{1\ldots m,1} = \frac{\tau_{1\ldots m-1}\,\tau_m}{T_{(m-1)m}} \tag{70}$$

عند الحد الفاصل m (m-1) تمر الانعكاسات الداخلية الناتجة

من الشريحة m إلى حدود نظام الشريحة $1..(m-1)$ الانعكاس $R_{(m-1)m}$ قد تم حسابه في $\tau_{(m-1)}$ ولهذا يتم طرحه. يمر جزء خلال نظام الشريحة $1...(m-1)$، إلاّ أن جزءاً آخر سينعكس مرة أخرى ويصل إلى الشريحة $(m+1)$ بعد مروره من الحد الفاصل $(m-1)m$ والشريحة m:

$$\tau_{1...m,2} = \tau_{1...(m-1)} \cdot \frac{\left(\rho_m - R_{(m-1)m}\right)}{T_{(m-1)m}} \cdot \frac{\overline{\rho}_{(m-1)...1}\tau_m}{T_{(m-1)m}} \qquad (71)$$

ومجموع جميع أجزاء الأشعة الواصلة إلى الوسط $(m+1)$ هي:

$$\tau_{1...m} = \frac{\tau_{1...(m-1)}\,\tau_m}{T_{(m-1)m}} \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{\left(\rho_m - R_{(m-1)m}\right)\overline{\rho}_{(m-1)...1}}{T_{(m-1)m}} \right]^{i-1} \qquad (72)$$

$$\tau_{1...m} = \frac{\tau_{1...(m-1)}\,\tau_m}{T_{(m-1)m} - \left(\rho_m - R_{(m-1)m}\right)\overline{\rho}_{(m-1)...1}} \qquad (73)$$

يتكون الجزء $\tau_{1..m}$ من المركِّبتين $\tau_{1..m||}$ و$\tau_{1..m}$ اللتين سيُضربان في مركّبات اتجاهات الاستقطاب المقابلة. والانعكاسيات الداخلية هي:

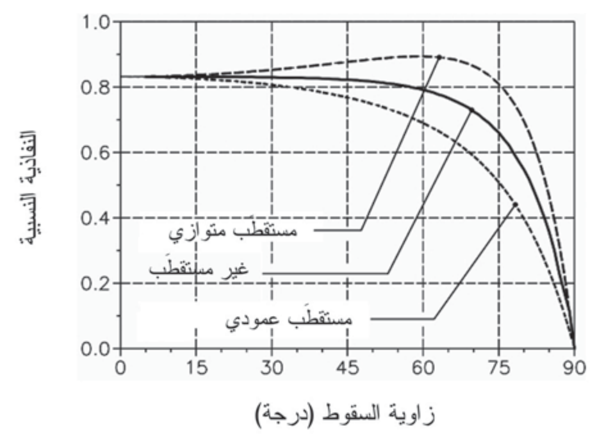
$$\overline{\rho}_{m...1} = \overline{\rho}_m + \frac{\overline{\tau}_m\,\tau_m\,\overline{\rho}_{(m-1)...1}}{T_{(m-1)m} - \overline{\rho}_{(m-1)...m}\left(\rho_m - R_{(m-1)m}\right)} \qquad (74)$$

الحل الآخر لنفاذيات الأنظمة المتعددة الطبقات هو طريقة المصفوفة المركَّبة المقترح من قِبَل (Klein and Furtak 1988)، و(Shabana and Namour 1990). ولفهم العملية البصرية بتفصيل أكثر فإن النموذج المقترح أعلاه هو الملائم جداً.

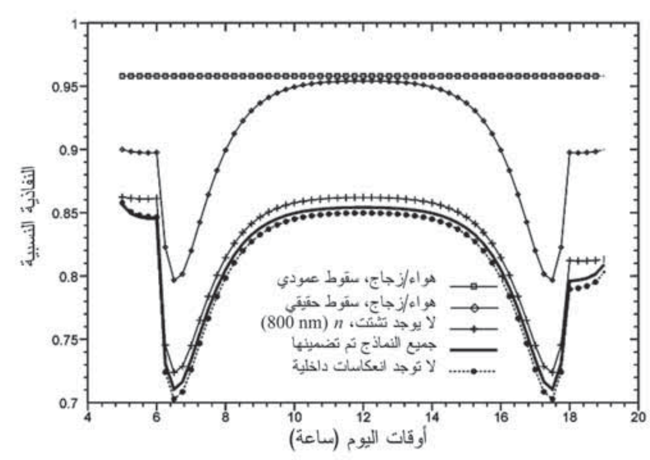
7-1-3-7 نتائج المحاكاة

يبيّن الشكل (7-18) النفاذية الحقيقية كدالة في زاوية السقوط لنظام بصري يتكون من ثلاث شرائح باستخدام النموذج الموصوف.

ويبيّن الجدول (7–4) معاملات الانكسار ومعاملات الامتصاص التي استُخدِمت لطول موجي. السماكة المستخدمة هو 2 mm للزجاج، و0.5 mm لأسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين (EVA)، و0.05 mm لـ TiO_2.



الشكل (7-18): النفاذية لنظام بصري يتكون من ثلاث شرائح كدالة لـــزاوية السقوط.



الشكل (7-19): النفاذية خلال منظومة فولتضوئية ليوم صاف باستخدام نماذج مختلفة (من دون امتصاص)

يبيّن الشكل (7–19) النفاذية للنظام البصري نفسه على مدى يوم (21 آذار/ مارس) لنصف كرة سماوي متباين الخواص - بتطبيق النموذج الموصوف في DIN 5034 ـ باستخدام الأطياف الفعلية (بالاستيفاء من أطياف CIE المعيارية) لظروف السماء الصافية. معاملات الانكسار مبيّنة في الجدول (7–4)، والامتصاص في الطبقات الثلاث العليا تم تهيئته إلى صفر. وتم تنفيذ برنامج المحاكاة لمنطقة تقع عند 30º جنوب خط الاستواء، وبزاوية ارتفاع 30º للنظام البصري مقاسة من المستوى الأفقي.

التأثير اللافت هو أن الأداء البصري ينخفض كثيراً بعد شروق الشمس (الساعة 6 صباحاً) وقبل غروب الشمس (الساعة 6 مساءً). هاتان القيمتان الصغيرتان يمكن تفسيرهما بفقد انعكاسي عالٍ للجزء المباشر للشعاع نتيجة زوايا السقوط المستوية. قبل شروق الشمس وبعد غروبها يوجد الجزء الانتشاري فقط الذي يعاني فقداً انعكاسياً صغيراً نسبياً. عند الظهيرة، تكون النفاذية أقصى ما يمكن. إضافة إلى ذلك، تم حساب قيم التأثيرات الناتجة من إجراء بعض التبسيطات على النموذج: يمكن ملاحظة انحرافات صغيرة نسبياً عن المسار الأصلي إذا أهمِلت الانعكاسات الداخلية؛ وهذا الإجراء يؤدي إلى تقدير منخفض للمردود في حدود 1 في المئة. وإهمال التشتت البصري يؤدي إلى تقدير عالٍ للمردود في حدود 1.5 في المئة. وإهمال الشرائح السفلية واستخدام السقوط الرأسي فقط للأشعة يؤدي إلى تقديرات عالية جداً للنفاذية، ولهذا يجب عدم تطبيق ذلك للنمذجة.

الجدول (4-7): معاملات الانكسار ومعاملات الامتصاص للمواد المستخدمة.

المادة (على طول مسار الاشعاعي إلى المنظومة)	الطول الموجي λ (nm)	معامل الانكسار n	معامل الامتصاص $\alpha\ (m)^{-1}$	المرجع
زجاج (Optiwhite)	400	1.54	1.22	
	550	1.52	4.56	(Flachglas) 1989
	600	1.52	1.96	
	800	1.52	4.38	
	1000	1.51	5.31	
أسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين EVA (Elvax 150، تصفيح لمدة 20دقيقة عند 149 ºC)	400	1.49	323.20	(Gueris) 1991
	600	1.47	26.15	
	800	1.45	23.65	
	1000	1.44	25.20	
	1200	1.43	25.75	
SiN_x(نيتريد سليكون مهدرج SiN_x:H)	300	2.10 [a] 3.10	[a]	(Lelièvre [et al.] 2005)
	400	2.23 [a] 3.42	[a]	
	500	2.00 [a] 3.30	[a]	
	600	1.98 [a] 3.06	[a]	
	700	1.95 [a] 2.92	[a]	
	850	1.93 [a] 2.87	[a]	
TiO_2 (مرسب عند درجة حرارة 300 «C)	400	2.73	بسبب الطبقة الرقيقة جداً لـ TiO_2 أُهمِل الامتصاص	(Jellison [et al] 1985)
	550	2.43		
	600	2.39		
	800	2.30		
	1000	2.27		

ZnO	589	2.0036		CRC 2005
	750	1.9662		
	1000	1.9435		
سليكون(*)	354	5.61		1994 CRC
	400	5.57	107	(Palik) 1985
	496	4.32	104	CRC 1994
	600	3.95		(Palik) 1985
	729	3.75	$2x10^3$	1994 CRC
	800	3.69		
	1000	3.57	102	(Palik) 1985

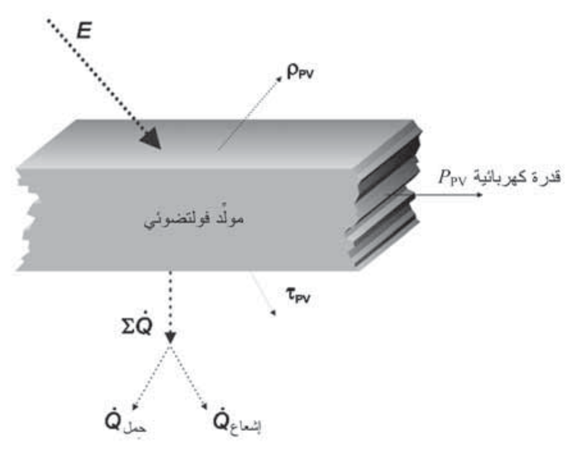
a معامل الانكسار يمكن تعديله في أثناء المعالجة بواسطة نسبة الغاز السلف NH_3/SiH_4، ومعاملات الامتصاص تعتمد بشدة على تلك النسبة أيضاً: كلما قلَّت النسبة كلما زاد معامل الانكسار وكلما زاد معامل الامتصاص.

* الجزء المركَّب *k* لمعامل الانكسار η للسليكون هو Palik 1985: k (λ=350nm) = 2,99؛ *k (*λ = 400 nm) = 0,39؛ k (λ = 500nm = 0,07؛ k (λ = 600nm) = 0,03؛ k (λ = 800 nm) = 0,01.

2-7 نموذج لإيجاد درجة الحرارة الفعلية للخلية

لا تعتمد القدرة الكهربائية الفعلية المُخرَجة للمنظومة الشمسية ذات الخلايا الشمسية السليكونية على الأشعة الشمسية التي يتم امتصاصها وتحويلها فقط، بل أيضاً على درجة حرارة التشغيل الفعلية للخلايا. ولأيّ زيادة في درجة الحرارة، فإن القدرة المُخرَجة والمردود ينخفضان بحوالي K/ في المئة 0,5 ـ . لهذا، من المهم إيجاد درجة حرارة التشغيل للخلية على مدى اليوم. يبدأ النموذج الحراري المقدم بالتوصيل للتدفق الحراري المتوافر من الخلايا إلى سطح المنظومة ومن ثم توزيعه من سطح المنظومة إلى الوسط المحيط بالحمل والإشعاع. ونمذجة المجموعة البصرية، والكهربية، والحرارية تعطي حساب العمليات والعوامل الآتية: الإشعاعية،

والانعكاسية، والنفاذية، والامتصاص، وتحويل الطاقة الفولتضوئية، واتزان التدفقات الحرارية، والتكوين الحراري للمنظومة، ودرجة حرارة الوسط المحيط، وسرعة الرياح، ودرجة الحرارة المكافئة للسماء لإيجاد التبادل الإشعاعي. ولمحاكاة أسوأ الحالات الظرفية، فإن أحد العوامل التي تركز عليها النمذجة هي الحمل الحراري الطبيعي. يوضح الشكل (7–20) رسماً تخطيطياً لتدفقات الطاقة البصرية، والكهربائية، والحرارية.



الشكل (7-20): رسم تخطيطي لتدفقات الطاقة الداخلة والخارجة لمنظومة فولتضوئية (تدفقات الطاقة البصرية رسمت كخطوط منقطة، والحرارية كخطوط متقطعة، والكهربائية كخطوط كاملة، وسماكة الخط يمثل القيمة النموذجية للتدفقات).

يُفترض أن تكون الخلايا شفافة، وتساهم الأشعة كلها التي يتم امتصاصها ناقصاً التحويل الفولتضوئي في توليد التدفق الحراري. يحدث الامتصاص كاملاً في الخلية الشمسية، ويتم إهمال الامتصاص وتوليد التدفق الحراري في طبقات التغليف. وهذا صحيح لأن المواد المستخدمة محسَّنة من أجل الحصول على نفاذية عالية، لهذا فإن الامتصاص منخفض جداً (مثلاً الامتصاص للزجاج

Optiwhite ذو سماكة 2 mm هو أقل من 0.5 في المئة للطول الموجي بين 400 nm ـ 1.200 nm، والامتصاص لأسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين EVA (ماركة Elvax 150) هو أقل من 1.5 في المئة للطول الموجي بين 450 nm ـ 1.100 nm).

7-2-1 التدفق الحراري المُدخَل

التدفق الكلي للطاقة على سطح المنظومة يتكون من الأجزاء الآتية:

1 أ) تبادل درجة الحرارة ـ الإشعاع لسطح المنظومة مع السماء (يتكون من الإشعاع السماوي والإشعاع الحراري للغلاف الجوي).

1 ب) تبادل درجة الحرارة ـ الإشعاع لسطح المنظومة مع سطح الأرض.

2) الانتقال الحراري من الجو إلى المنظومة (المنظومة لها على الأقل درجة حرارة الوسط المحيط خلال اليوم).

3 أ) إشعاعية أرضية مباشرة للشمس ($0.35\mu m < \lambda < 2\mu m$ غير مستقطَبة $V = 0\%$).

3 ب) إشعاعية أرضية انتشارية للشمس ($0.35\mu m < \lambda < 2\mu m$ مستقطَبة $V = 70\%$).

3 ج) البياض (Albedo) (الأشعة الشمسية المنعكسة من سطح الأرض على المنظومة؛ ويعتمد كثيراً على خصائص سطح الأرض المحيط بالمنظومة؛ ومن الصعب جداً حسابه بدقة).

هذا التدفق الكلي للطاقة ينعكس جزئياً بواسطة تغليف المنظومة والخلية الشمسية (انظر القسم 7-1-3) أو يتم تحويله إلى كهرباء وتوزيعه على النقاط الطرفية. وتدفق الطاقة الباقي الذي يتم امتصاصه في الخلية هو التدفق الحراري المُدخَل.

7-2-1-1 التدفق الحراري المُدخَل عن طريق الإشعاع السماوي والأرضي

بالرغم من أن درجة حرارة الأرض والسماء بشكل عام أقل من درجة حرارة المنظومة خلال النهار، إلاّ أن الطاقة المُدخَلة إلى المنظومة عن طريق التبادل الإشعاعي سالبة، ولهذا سيتم التعامل معها لاحقاً في القسم 7-2-3.

7-2-1-2 التدفق الحراري المُدخَل عن طريق درجة حرارة الوسط المحيط

نتيجة السعة الحرارية النوعية المنخفضة نسبياً (C_p = 7.3-11.3 $kJm^{-2}K^{-1}$) للمنظومة ومعامل الانتقال الحراري الجيد نسبياً، تصل المنظومة إلى درجة حرارة الوسط المحيط سريعاً (استثناء: انظر الأقسام من 10-4-3 إلى 10-4-3). وتبيّن قياسات درجة الحرارة والإشعاعية وجود علاقة مشتركة بين الانعكاسية ودرجة حرارة الوسط المحيط. نستخدم طريقة مبسطة مقترحة من قِبَل (Abid) 1987 لتوضيح علاقة جيب تمام مسار درجة الحرارة بفرق طور $t\text{-}t_0$ ساعة مقابل مسار درجة الحرارة خلال اليوم. بالرغم من أن عابد (1987) يقترح أقصى درجة حرارة للوسط المحيط عند الساعة صفر (t_0) تساوي 18 للمناطق المناخية الحارة القاحلة، إلاّ أن الأبحاث الأحدث بواسطة فاركاس (Farkas) 1992 تقترح أنها تساوي ($t_0 = 14$) ساعة. وبعد المقارنة بالبيانات المقاسة، تم تنفيذ مقترح فاركاس 1992، الذي لم يُظهر تطابقاً مع درجة الحرارة الصغرى المقاسة عند شروق الشمس، إلاّ أن درجة الحرارة القصوى التي اقترحها كانت مطابقة جداً للقياسات.

$$T_A = \overline{T}_A + \left(T_{A,\max} - \overline{T}_A\right)\cos\left(\frac{\pi}{12}\left(t - t_0\right)\right) \qquad (75)$$

حيث:

T_A: درجة حرارة الوسط المحيط (K).

$T_{A,\ max}$: أقصى درجة حرارة خلال اليوم (K).

$\bar{T}_A$: متوسط درجة حرارة الوسط المحيط (K).

t : أوقات اليوم (ساعة).

t_0: الوقت عند أقصى درجة حرارة (ساعة).

وفقاً لروشنباخ (Rauschenbach 1980)، تكون درجة حرارة الوسط المحيط عالية جداً في المناطق الحارة القاحلة عند السرعات المنخفضة جداً للرياح. وشروط درجات الحرارة هذه هي التراكمات الموضعية للجو الحار عند زوايا ارتفاع عالية للشمس (كتلة هوائية AM منخفضة). ويذكر روشنباخ (1980) أنه بمساعدة الانعكاسات الأرضية لظاهرة البياض مؤقتاً، فإن بلوغ درجات حرارة 70ºC يكون ممكناً. وفي المناطق المناخية غير القاحلة، يعتمد مسار درجة الحرارة بشكل كبير على الطقس والفصل السنوي. لهذا، يوصى لمثل هذه المناطق ذات الظروف المناخية المتغيرة باستخدام بيانات جاهزة لدرجات الحرارة.

7-2-1-3 التدفق الحراري المُدخَل عن طريق الإشعاعية

تتكون الإشعاعية الساقطة من إشعاعية مباشرة وإشعاعية انتشارية، أي المشتتة في الغلاف الجوي للأرض. هذه الإشعاعية الساقطة تعمل كمُدخل للنموذج البصري المشروح في القسم 7-1-3. وأجزاء الإشعاعية، التي تصل إلى الخلية ولكن لا يمكن تحويلها إلى كهرباء خلال العملية الفولتضوئية، هي المساهِم الرئيس للتدفق الحراري المُدخل. وإذا لم تؤخذ الانعكاسات الأرضية (البياض) في الاعتبار، فإن المعادلة الآتية تعتبر صالحة:

$$\dot{Q} = P_{in}(1-\eta_{PV}) = A \cdot E_{cell}(1-\eta_{PV}) \tag{76}$$

حيث:

A: مساحة السطح الأمامي للمنظومة (m^2).

E_{cell}: لإشعاعية الواصلة إلى الخلية ($W.m^{-2}$).

P_{in}: القدرة المُدخلة للإشعاعية إلى الخلايا الشمسية (W).

Q : التدفق الحراري الكلي في المنظومة (W).

η_{PV}: كفاءة التحويل الفولتضوئي للخلايا الشمسية.

و:

$$E_{cell} = 0.5E_{dir}(\tau_{123,\parallel} + \tau_{123,\perp}) + \int_0^{\frac{\pi}{2}}\int_0^{2\pi} E_{dif,\parallel}(\alpha_P,\gamma_P)\tau_{123,\parallel} + E_{dif,\perp}(\alpha_P,\gamma_P)\tau_{123,\perp} d\alpha_P d\gamma_P \tag{77}$$

حيث:

E_{dir}: الإشعاعية المباشرة على سطح المنظومة (Wm^{-2}).

E_{dif} (*P*): الإشعاعية الانتشارية من النقطة *P* الواقعة في نصف الكرة السماوي على سطح المنظومة ($W.m^{-2}$).

α_p: زاوية السمت للنقطة *P* (درجة).

γ_p: زاوية الارتفاع للنقطة *P* (درجة).

τ_{123}: النفاذية البصرية للتغليف كاملاً.

$\parallel$: الاستقطاب الموازي لمستوى السقوط.

$\perp$: الاستقطاب العمودي على مستوى السقوط.

الجزء الذي يتم تبديده كهربياً لا يتعمد على كفاءة التحويل المحتملة فقط، بل أيضاً على تهيئة مقاومة الحِمل إلى الخصائص *V-I* للخلية الشمسية. للتبسيط، نفترض أن القدرة الكهربائية القصوى المتوافرة يتم أخذها دائماً من النقاط الطرفية. وسيناريو أسوأ الأحوال

يقترح استخدام ظروف دائرة القِصَر أو الدائرة المفتوحة، نتيجة التولد الحراري المرتفع، إلاّ أن هذه الظروف ليست نموذجية للاستخدام الشائع للمولدات الشمسية.

7-2-2 انتقال الحرارة في داخل المنظومة

الجزء الممتص للإشعاعية الذي لا يمكن تبديده كهربياً يقوم بتوليد تدفق حراري. هذا التدفق الحراري يجب أن يصل إلى سطح المنظومة (تدفق حراري مستقر)، أو سيرفع من درجة حرارة المنظومة (تدفق حراري غير مستقر).

7-2-2-1 المخطط البُعدي للنموذج الحراري

بالنسبة إلى طول وعرض المنظومة، مسار الانتقال الحراري رأسياً خلال الطبقات أقصر بكثير. وبالتالي، يمكن تطبيق نمذجة ذات بعد واحد للطبقات (بافتراض سطح لا نهائي). وهذا التبسيط حتى أنسب كثيراً بالرغم من أن مساحة المنظومات كانت تتزايد خلال السنوات الماضية (انظر الجدول (7-5)). ونتيجة مساعي خفض التكلفة، تم التقليل من التشكيل الإطاري وبنية الدعامة أيضاً، اللذين يرفعان من دقة فرضية البُعد الواحد.

الجدول (7-5): تطور حجم وقدرة المنظومة الفولتضوئية.

السنة	المساحة (m^2)	القدرة (W_p)	النوع؛ الشركة المنتجة	ملاحظات
1979	0.17 (0.47 × 0.37)	10.9	BPX 47A؛ Valvo	خلايا مدوّرة، sc-Si
1979	0.27 (0.58 × 0.47)	18.3	BPX 47B/20; Valvo	خلايا مدوّرة، sc-Si
1983	0.50 (1.08 × 0.46)	50	PQ 40/50; AEG	الآن /Schott ASE, mc-Si
1985	1.50 (1.47 × 1.02)	130	SM 144; Siemens	خلايا مدوّرة، sc-Si

1991	1.11 (1.12x0.99)	120	MSX-120; Solarex	إنتاج متسلسل، mc-Si
1991	1.84 (1.10x1.68)	188	PS 184 T; Nukem	MIS-I
1992	0.94 (1.10x0.86)	96	PS 94 MP 96; Nukem	إنتاج متسلسل، MIS-I
1992	0.82 (1.27x0.64)	100	M 100 L; Siemens	إنتاج متسلسل، sc-Si
1994	2.42 (1.89x1.28)	285	ASE-300-DG/; 50 ASE	إنتاج متسلسل، EFG-Si
2003	4.5	500	P 500 Solon AG	طراز بدائي، mc-Si
2005	12.5	1500	Ertl Glass, Austria	طراز بدائي

7-2-2-2 التدفق الحراري المستقر في المنظومة

يُعطى التدفق الحراري بالتوصيل في داخل المنظومة من الخلية وخلال ثلاث طبقات إلى السطح الأمامي للمنظومة وإلى سطحها الخلفي أيضاً على النحو الآتي:

$$\dot{Q}_F = A(T_C - T_F)\sum_{i=1}^{3}\frac{k_i}{d_i} = \frac{T_C - T_F}{R_{k,F}} \quad (78)$$

$$\dot{Q}_B = A(T_C - T_B)\sum_{i=4}^{6}\frac{k_i}{d_i} = \frac{T_C - T_B}{R_{k,B}} \quad (79)$$

حيث:

A: مساحة السطح الأمامي للمنظومة .(m^2).

d_i: سماكة الطبقة i في m.

Q_F: التدفق الحراري من الخلايا إلى السطح الأمامي للمنظومة (W).

Q_B : التدفق الحراري من الخلايا إلى السطح الخلفي للمنظومة (W).

$R_{k,F}$: المقاومة الحرارية من الخلايا إلى السطح الأمامي للمنظومة ($K.W^{-1}$).

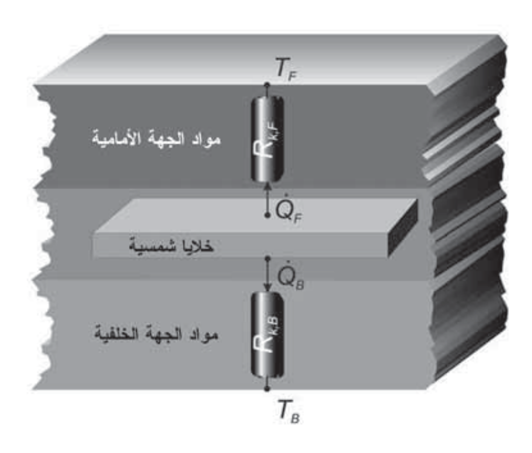
$R_{k,B}$: المقاومة الحرارية من الخلايا إلى السطح الخلفي للمنظومة ($K.W^{-1}$).

T_C : درجة حرارة الخلية (K).

T_F : درجة حرارة السطح الأمامي للمنظومة (K).

T_B : درجة حرارة السطح الخلفي للمنظومة (K).

k_i : الموصلية الحرارية للطبقة i $(W.m^{-1}.K^{-1})$.



الشكل (7-21): المكافئ الحراري للدائرة الكهربية للتوصيل الحراري في المنظومة الفولتضوئية.

ويمكن حساب درجة حرارة الخلية T_C بمعرفة (أو بقياس) درجة حرارة السطحين الأمامي والخلفي للمنظومة (T_F وT_B) والتدفق الحراري على النحو الآتي:

$$T_C = \frac{\dot{Q} R_{k,F} R_{k,B} + T_F R_{k,B} + T_B R_{k,F}}{R_{k,F} + R_{k,B}} \quad (80)$$

7-2-2-3 التدفق الحراري غير المستقر في المنظومة

المواد المستخدمة ليست لها موصليات حرارية معينة فقط، بل سعات حرارية محددة C_p أيضاً. وللتدفق الحراري المخزون Q_{sto}، تعتبر العلاقة الآتية صالحة:

$$\dot{Q}_{sto} = C_p \frac{dT}{dt} = c_p \rho d_i A \frac{dT}{dt} \quad (81)$$

حيث:

A : مساحة السطح الأمامي للمنظومة (m^2).

c_p: السعة الحرارية النوعية للمادة ($Jkg^{-1} K^{-1}$).

C_p : السعة الحرارية للمادة (JK^{-1}).

d_i : سماكة الطبقة i (m).

Q_{sto}: التدفق الحراري المخزون (W).

ϱ : كثافة المادة (kgm^{-3}).

وبهذا، يمكن حساب درجة حرارة الخلية T_C على النحو الآتي:

$$T_C = \frac{\left(\dot{Q} - \dot{Q}_{sto}\right) R_{k,F} R_{k,B} + T_F R_{k,B} + T_B R_{k,F}}{R_{k,F} + R_{k,B}} \quad (82)$$

7-2-3 تبدد الحرارة

تبدد حرارة المنظومة الساخنة يتم من خلال العمليات الآتية:

1 - انتقال الحرارة عن طريق تبادل الإشعاع الحراري مع السماء والأرض.

2 - انتقال الحرارة بالحمل الحراري.

3 – انتقال الحرارة بالتوصيل الحراري نحو سعة حرارية.

انتقال الحرارة بالتوصيل من المنظومة إلى بنية الدعامة يتم إهماله. وبالرغم من أن هذا يحدث عادة في التشكيل الإطاري للمنظومة فقط، إلاّ أنه يعتمد بشكل كبير على نوع التركيب، ولهذا يُستخدم نموذج البُعد الواحد (انظر القسم 7–2–2–1).

7–2–3–1 تبادل الإشعاع الحراري مع السماء والأرض

يحدث تبادل الإشعاع الحراري بين المنظومة والسماء دائماً عندما تكون درجة حرارة سطح المنظومة أعلى من درجة حرارة السماء، ويُظهِر سطح المنظومة انبعاثية حرارية. وبالرغم من أن الزجاج شفاف تقريباً للأشعة تحت الحمراء وفقاً لشولز (Scholze 1988)، إلاّ أن تبادل الإشعاع الحراري بواسطة الخلية يمكن إهماله لدرجات الحرارة الأقل من 230ºC. بالتالي، فإن تبادل الإشعاع الحراري يتم من سطح المنظومة فقط، حيث إنه يمكن تطبيق قانون ستيفان ـ بولتزمان (Stefan-Boltzmann) للإشعاع الحراري:

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \varepsilon A T_M^4 \qquad (83)$$

حيث:

Q_{rad}: تدفق حرارة الإشعاع الحراري (W).

A : مساحة السطح المشع (m^2).

T_M: درجة حرارة سطح المنظومة (K).

σ : ثابت ستيفان ـ بتولزمان ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4}).

$\varepsilon = f(T_M)$: الانبعاثية الحرارية للسطح كدالة في درجة حرارة السطح (في الأشعة تحت الحمراء).

الطول الموجي الذي عنده يحدث أقصى انبعاث للجسم الأسود ($\varepsilon = 1$) يعطى بـ «قانون الإزاحة لواين» (Wien's Displacement Law):

$$\lambda_{max} = \frac{2,887,800}{T} \quad K\ (nm) \tag{84}$$

حيث الطول الموجي بالنانومتر (nm) عند أقصى انبعاث وλ_{max} درجة الحرارة بالكلفن (K).

على سبيل المثال، الطول الموجي للجسم الأسود الذي درجة حرارته $75\ C^o$، عند أقصى انبعاث هو حوالى 8300 nm؛ وللجسم الأسود عند درجة حرارة 6000 K (سطح الشمس) هو حوالى 550 nm. إن الانبعاثات الحرارية $\varepsilon\ (T_m)$ لمواد البناء العادية للمنظومات الفولتضوئية مبيّنة في الجدول (أ ـ 14) في الملحق.

التدفق الحراري بالتبادل الإشعاعي بين جسمين رماديين بدرجتي حرارة T_1 وT_2 يعطى بالعلاقة الآتية:

$$\dot{Q}_{12} = \frac{\sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2 A_1 \varphi_{12}}{1-(1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)\varphi_{12}\varphi_{21}}\left(T_1^4 - T_2^4\right) \tag{85}$$

ما يُسمى عامل الرؤية يجب حسابه بشكل مستقل لجميع الاحتمالات الممكنة للتبادل الإشعاعي للجهتين الأمامية والخلفية للمنظومة، والسماء، والأرض (انظر الشكل (7–22)). لعامل الرؤية (View Factor) من الجانب الأمامي إلى السماء ومن الجانب الخلفي إلى السماء، وأيضاً لعامل الرؤية من الجانب الأمامي إلى الأرض ومن الجانب الخلفي إلى الأرض، يمكن اشتقاق المعادلات الآتية (حيث زاوية ارتفاع المنظومة):

$$\varphi_{FS} = 0.5(1+\sin(90^\circ - \gamma_M)) \tag{86}$$

$$\varphi_{FG} = 0.5(1-\sin(90^\circ - \gamma_M)) \tag{87}$$

$$\varphi_{BS} = 0.5(1-\cos\gamma_M) \tag{88}$$

$$\varphi_{BG} = 0.5(1+\cos\gamma_M) \tag{89}$$

ولعامل الرؤية العكسي (أي من الوسط المحيط إلى المنظومة)، فإن المعادلة الآتية تعتبر صالحة:

$$\varphi_{21} = \frac{A_1}{A_2}\varphi_{12} \tag{90}$$

وحيث إن مساحة الوسط المحيط A_2 لا نهائية فإن عامل الرؤية العكسي يصبح صفراً، وتصبح المعادلة (85) كالآتي:

$$\dot{Q}_{12} = \sigma\,\varepsilon_1\varepsilon_2 A_1\varphi_{12}\left(T_1^4 - T_2^4\right) \tag{91}$$

بالتالي، يتمثل انتقال الحرارة بالإشعاع بالمعادلات الآتية:

$$\dot{Q}_{FS} = \sigma\,\varepsilon_F\varepsilon_S A_F\varphi_{FS}\left(T_S^4 - T_S^4\right) \tag{92}$$

$$\dot{Q}_{FG} = \sigma\,\varepsilon_F\varepsilon_G A_F\varphi_{FG}\left(T_F^4 - T_G^4\right) \tag{93}$$

$$\dot{Q}_{BS} = \sigma\,\varepsilon_B\varepsilon_S A_B\varphi_{BS}\left(T_B^4 - T_S^4\right) \tag{94}$$

$$\dot{Q}_{BG} = \sigma\,\varepsilon_B\varepsilon_G A_B\varphi_{BG}\left(T_B^4 - T_G^4\right) \tag{95}$$

وتبادل الإشعاع الحراري الكلي هو مجموع هذه المعادلات، أي إن:

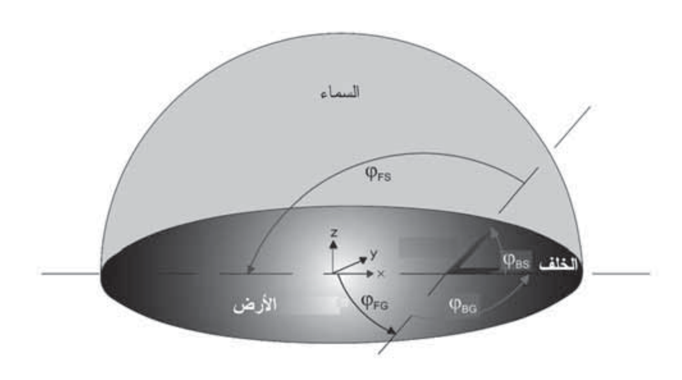
$$\dot{Q}_{rad} = \dot{Q}_{FS} + \dot{Q}_{FG} + \dot{Q}_{BS} + \dot{Q}_{BG} \quad (96)$$

باستخدام المعادلات من (86) إلى (89) في المعادلات (92) إلى (95) ومن ثم تضمين ذلك في المعادلة (96)، نحصل على النتيجة الآتية:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{rad} = \frac{1}{2}\sigma \Big[& A_F \varepsilon_F \Big(\varepsilon_S \big(T_F^4 - T_S^4\big)(1+\sin(90^\circ - \gamma_M)) \\ & + \varepsilon_G \big(T_F^4 - T_G^4\big)(1-\sin(90^\circ - \gamma_M)) \Big) \\ & + A_B \varepsilon_B \Big(\varepsilon_S \big(T_B^4 - T_S^4\big)(1-\cos\gamma_M) \\ & + \varepsilon_G \big(T_B^4 - T_G^4\big)(1-\cos\gamma_M) \Big) \Big]\end{aligned} \quad (97)$$

لزوايا الارتفاع الصغيرة (مثلاً للمناطق القريبة من خط الاستواء) يمكن إهمال Q_{FG} وQ_{BS}، بينما $Q_{FG} = Q_{BS} = 1$ بالتالي، تصبح معادلة تبادل الإشعاع الكلي كالآتي:

$$\dot{Q}_{rad}(\gamma_M \simeq 0^\circ) = \dot{Q}_{FS} + \dot{Q}_{BG} = \sigma \Big(\varepsilon_F \varepsilon_S (T_F^4 - T_S^4) + \varepsilon_B \varepsilon_G (T_B^4 - T_G^4) \Big) \quad (98)$$



الشكل (7-22): تعريف عوامل الرؤية φ لتبادل الإشعاع الحراري بين المنظومة الشمسية الأرضية، والسماء، والأرض.

7-2-3-2 إيجاد درجة حرارة السماء

تعطى درجة حرارة السماء T_H (درجة الحرارة المكافئة للسماء المكشوفة من أجل ($\varepsilon_s = 1$) بمعادلة سوينبانك (Swinbank 1963) على النحو الآتي:

$$T_S = 0.0552 T_A^{1.5} \qquad (99)$$

حيث T_S درجة حرارة السماء بالكلفن (K)، وT_A درجة حرارة الوسط المحيط بالكلفن (K). أو حتى وفقاً لفرضية مبسّطة كثيراً من قِبَل ويلر (Whiller 1967):

$$T_S = T_A - 6K \qquad (100)$$

والطريقة الأكثر شمولاً وأكثر دقة (باستخدام الرطوبة النسبية للجو أيضاً (HR) كمعامل) مقترحة من قِبَل (Abid, 1987) على النحو الآتي:

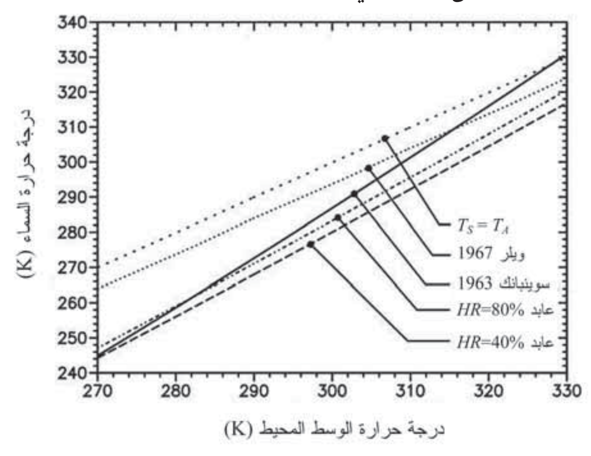
$$T_S = T_A \sqrt[4]{\left(5.7723 + 0.9555 + (0.6017)^7\right) \times 10^{-4}\, T_A^{1.1893}\, HR^{0.0665}} \qquad (101)$$

يبيّن الشكل (7-23) مقارنةً بين النماذج المختلفة المستخدمة لحساب درجة حرارة السماء T_S كدالة في درجة حرارة الوسط المحيط T_A. بشكل عام، الحسابات المتقدمة كانت تستخدم النموذج المقترح من قِبَل (Abid, 1987) عند HR = 40 في المئة.

7-2-3-3 تبدد الحرارة بالحمل الحراري الطبيعي

يحدث انتقال الحرارة بالحمل الحراري الطبيعي عندما تكون درجة حرارة سطح المنظومة T_M أعلى من درجة حرارة الوسط المحيط T_A. ويكون الحمل الحراري ممكناً على الأقل في سطح

واحد للمنظومة. والتدفقات الحرارية الحملية لا يمكن حسابها رياضياً بدقة، ولهذا يجب حسابها بطريقة التكرار أو بواسطة معادلات التقريب، كما هو موضح هنا. نقوم أولاً بتعريف بعض الخصائص المهمة المتعلقة بالحمل الحراري:



الشكل (7-23): درجة حرارة السماء T_S كدالة في درجة حرارة الوسط المحيط T_A محسوبة باستخدام نماذج مختلفة.

عدد براندتل *Pr* (Prandtl Number) هو الخاصية التي تقارن بين طريقتي انتقال جزيئين: الانتقال الحثي بالاحتكاك والانتقال الحراري بالتوصيل الحراري. وعدد براندتل دالة في درجة الحرارة ويعتمد على الخواص الفيزيائية للمائع. يبقى عدد براندتل لجزيئات الغاز التي لها عدد الذرات نفسها، ثابتاً.

عدد رينولدز *Re* (Reynolds Number) يقوم بإيجاد انتقال الحرارة في الحمل الحراري القسري. وقيمته أيضاً تحدد نوع التدفق ـ فيما إذا كان اضطرابياً أو صفحياً. ويعتبر نوع التدفق ذا دلالة فاصلة: في التدفق الصفحي لا تحدث حركة اختلاط ويكون الانتقال الحراري منخفضاً. وفي مناطق التدفق الاضطرابي يعتمد سماكة

الطبقة الحدودية لبراندتل على عدد رينولدز. و«ظاهرة الحك» في قلب التدفق الاضطرابي (المتدفق بسرعة w) تحاول أن تقلل من سماكة الطبقة الحدودية للتدفق الصفحي؛ واللزوجة v تعمل في اتجاه معاكس لذلك مدعومة بسطح الجدار الخشن (غير متضمَّن بشكل مباشر في عدد رينولدز).

عدد غراشوف (Grashof number) *Gr* يعطي النسبة بين قوة الطفو الحراري إلى «البطء» الداخلي. في حالة ظروف التدفق الحر، يتم حساب الحمل الحراري الطبيعي للانتقال الحراري فقط. والفرق في درجة الحرارة بين الجدار ومتوسط درجة حرارة الأوساط المتدفقة، الذي يؤدي إلى تغير بالحجم، وبالتالي إلى تغير بالكثافة في بعض أجزاء الأوساط المتدفقة، هو القوة المحركة للحمل الحراري الطبيعي.

عدد نوسيلت (Nuâelt number) *Nu* يوضح النسبة بين كثافة الفيض الحراري إلى التوصيل الحراري الصافي خلال طبقة مكافئة للطول ذي الصلة l الذي يحدث عنده التدفق.

بالإضافة إلى عدد نوسيلت *Nu* وعدد براندتل *Br*، المعامل الآخر المهم للحمل الحراري الطبيعي هو **عدد رايلي** (Rayleigh Number) *Ra*. إذا تجاوز *Ra* قيمة ابتدائية معينة تسمى «عدد رايلي الحرج» Ra_{cr}، فإن الطبقة الحدودية للحمل الحراري تُزال، ما يجعل انقسام الحالة ضروري للانتقال الحراري الحملي. ويتم حساب *Ra* كالآتي:

$$Ra = Pr \cdot Gr = Pr\frac{g\beta c_p \rho l_{ch}^3}{\eta k}\left(T_M - T_A\right) = Pr\frac{g\beta l_{ch}^3}{Nu}\left(T_M - T_A\right) \quad (102)$$

حيث:

Gr : عدد غراشوف.

Nu : عدد نوسليت.

Pr : عدد براندتل.

g : عجلة الجاذبية الأرضية ($g = 9.8067\ ms^{-2}$).

β : معامل التمدد الحراري للهواء الجوي (K^{-1}).

η : اللزوجة الديناميكية ($Nm^{-2}s$ أو $Pa\ s$).

l_{ch} : طول الجسم ذو الصلة بالتدفق (m).

T_A : درجة حرارة الوسط المحيط (K).

T_M : درجة حرارة سطح المنظومة (K).

ويمكن حساب عدد رايلي الحرج Ra_{cr} بالتقريب الآتي:

$$Ra = 10^x , \quad x = 8.9 - 0.00178(90^\circ - \gamma_M)^{1.82} \qquad (103)$$

وعدد براندتل Pr هو:

$$Pr = \frac{\eta c_p}{k} \qquad (104)$$

حيث:

c_p : السعة الحرارية النوعية مقاسة بـ ($Nmkg^{-1}\ K^{-1}$).

η اللزوجة الديناميكية للهواء مقاسة بـ $P_{a\ s}$.

k : الموصلية الحرارية للهواء الجوي مقاسة بـ ($Wm^{-2}K^{-1}$).

x : متغيّر مساعد.

Υ_M : زاوية ارتفاع المنظومة (درجة زاوية).

بإدراج المعادلة (103) في المعادلة (102) مستخدمين معاملات الهواء الجوي المرتبطة بمسألتنا من الجدول (أ ـ 15) في الملحق (مع $_M = 45^o$ و $l_{ch} = 1.3\ m$) معندما يكون Ra أكبر من Ra_{cr}. ولكي تتحقق المعادلة يتوجب أن يكون $T_M - T_A > 0.05\ K$، والتي تعتبر صحيحة دائماً خلال النهار، وبالتالي يمكننا افتراض بأن الطبقة الحدودية مُزالة حتماً. وللسطح العلوي لمستوى مائل، فإن عدد نوسيلت $R_a > Ra_{cr}$ (وفقاً لـ (Fujii [et al.] 1972):

$$Nu_F = 0.56\sqrt[4]{Ra_{cr}\sin\gamma_M} + 0.13\left(\sqrt[3]{Ra} - \sqrt[3]{Ra_{cr}}\right) \qquad (105)$$

وبهذا، فإن معامل الانتقال الحراري الحملي للحمل الحراري الطبيعي (*nc*) في السطح الأمامي (*F*) هو كالآتي:

$$h_{nc,F} = \frac{Nu_F\, k}{l_{ch}} \qquad (106)$$

على العكس من السطح الأمامي للمنظومة، فإن إزالة الطبقة الحدودية ليس ممكناً على الجانب الخلفي لها، بالرغم من أن الهواء الساخن خاضع للطفو ويمكنه أن ينطلق فقط من السطح الخلفي للمنظومة. لعدد نوسيلت *Nu* في الطبقة الحدودية غير المزالة ولزاوية ارتفاع، فإن معادلة ميركر (Merker, 1987) تعتبر صالحة إذا استبدل *Ra* بـ $R_a \sin\gamma_m$ أي إن:

$$Nu_B = 0.56\sqrt[4]{Ra\sin\gamma_M} \qquad (107)$$

بالتالي، فإن معامل الانتقال الحراري الحملي للجانب الخلفي (*B*) هو:

$$h_{nc,B} = \frac{Nu_B\, k}{l_{ch}} = 0.56\frac{k}{l_{ch}}\sqrt[4]{Ra\sin\gamma_M} \qquad (108)$$

المشكلة الأساسية في إجراء حسابات متقدمة هي أن معاملات الانتقال الحراري دوال في درجات حرارة السطحين الأمامي T_F والخلفي T_B. ودرجات الحرارة هذه يمكن حسابها بعد حساب معامل الانتقال الحراري فقط لأنه يعتمد على توازن التدفقات الحرارية. لهذا، يجب تطبيق طريقة التكرار. وهذا سمح باستخدام درجة حرارة الطبقة الحدودية أيضاً (متوسط درجة حرارة الوسط المحيط ودرجة حرارة سطح المنظومة) بدلاً من درجة حرارة الوسط المحيط T_A. كما يجب إعطاء قيم تقديرية ابتدائية لطريقة التكرار. وأفضل تقدير هو: $T_F = T_B = T_A + 30K$.

الخصائص المتعلقة بالهواء الجوي (Pr، k، c_p، ρ) عند درجات حرارة مختلفة مبيّنة في الملحق في الجدول (أ ـ 10). في نموذج مبسط جداً مقترح من قِبَل فَنْك (Funck) 1985 (تم تطبيقه على التصميم الحراري لصناديق التروس)، معاملات الانتقال الحراري (للحمل الحراري الطبيعي للأجسام الصغيرة) للأسطح الأفقية والرأسية متساوية. وبالرغم من أن زاوية ارتفاع المنظومات الشمسية هي بين القيمتين القصوى للأفقي (الأنظمة الفولتضوئية عند خط الاستواء) وللرأسي (الواجهات الفولتضوئية)، ومسار الدالة أيضاً (زاوية الارتفاع مقابل معامل الانتقال الحراري) مستمر، إلاّ أن مقترح (Funck, 1985) يمكن استخدامه كتقريب لا يعتمد على زاوية الارتفاع للانتقال الحراري بواسطة الحمل الحراري الطبيعي في المنظومات الشمسية الصغيرة.

$$h_{nc} = \frac{12.1\left(\frac{T_M - T_A}{T_M}\right)^{0.3}}{\sqrt[10]{l_{ch}}} \qquad (109)$$

حيث:

h_{nc}: معامل الانتقال الحراري للحمل الحراري الطبيعي ($Wm^{-2}K^{-1}$).

l_{ch}: طول المنظومة الذي يحدث فيه الحمل الحراري (m).

T_A: درجة حرارة الوسط المحيط (K).

T_M: درجة حرارة سطح المنظومة (K).

الطول l_{ch} الذي يحدث فيه الحمل الحراري ليس له تأثير كبير في معامل الانتقال الحراري h_{nc}، لأنه يؤثر في النتيجة فقط بمقدار الجذر العاشر لمقلوب قيمته. وهذا يعني أنه لجميع أطوال المنظومات الفولتضوئية المتوافرة في السوق لتطبيقات القدرة الكهربية، فإن تفاوت معامل الانتقال الحراري للحمل الحراري الطبيعي هو 5 في المئة فقط.

7-2-3-4 تبدد الحرارة بالحمل الحراري القسري

على العكس من الحمل الحراري الطبيعي، فإن حد الطفو مُهمل في المعادلة (102)، وبالتالي لا يمكن أن تنشأ الخصائص التي تتكون من أيّ جزء من حد الطفو (Ra وGr). لهذا، في الحمل الحراري القسري، تعتبر الخصائص Nu، وRe، وPr فقط ذات أهمية.

لحالة التدفق الموازي للسطح، فإن الطول المميِّز l_{ch} يساوي طول المنظومة L إذا كان اتجاه الرياح في موازاة طول المنظومة. وإذا كان اتجاه الرياح موازياً لعرض المنظومة $l_{ch} = B$ فإن. الحالة **الأولى** يمكن أن تحدث في التركيب الأفقي للمنظومة فقط ($\Upsilon_m = 0^o$) أو في الاتجاه الموجّه لتدفق الرياح (مثلاً، في محطات القدرة الفولتضوئية الكبيرة جداً أو في مواقع سفوح التل). والحالة **الثانية** يمكن أن تحدث عندما يكون اتجاه الرياح رأسياً على الاتجاه السمتي للمنظومة (أي الرياح الشرقية والغربية). وجميع الحالات الأخرى سيتم اعتبارها «تدفقاً مائلاً عن الرأسي على المستوى» (انظر أدناه).

اعتماداً على سرعة التدفق، يمكن أن تنشأ طبقة حدودية صفحية أو اضطرابية. ونتيجة معاملات الانتقال الحراري العالية وأعداد نوسبيلت، يكون التبادل الحراري أفضل بمعامل أو مُعاملين في الحالة الاضطرابية. وشرط الاضطراب هو $R_e > 10^5$، وهذا صحيح لسرعة الرياح المعطاة وفقاً للعلاقة الآتية:

$$w > \frac{10^5 v}{l_{ch}} \tag{110}$$

باستخدام $T_A = 293.15\ K$، فإن شرط الاضطراب صحيح لـ $w > 1.33\ ms^{-1}$، التي تساوي 2 بوفورت (Beaufort). وفي الطبقة الحدودية الاضطرابية، تعتبر المعادلتان الآتيتان صالحتين (انظر مثلاً Merker 1987):

$$Nu_{tur} = \frac{0.037 Re^{0.8} Pr}{1 + 2.433 Re^{-0.1}\left(\sqrt[3]{Pr^2} - 1\right)} \tag{111}$$

$$h_{tur} = \frac{k}{l_{ch}} Nu_{tur} = \frac{0.037 Re^{0.8} Pr\, k}{l_{ch}\left(1 + 2.433 Re^{-0.1}\left(\sqrt[3]{Pr^2} - 1\right)\right)} \tag{112}$$

بالنسبة إلى سرعات الرياح الأقل من 1.33 m/s، فإن الطبقة الحدودية الصفحية يمكن أن تحدث إذا لم يكن التدفق قد أصبح اضطرابياً قبل وصوله إلى اللوح. وللطبقة الحدودية الصفحية الصافية، فإن معامل التدفق الحراري هو:

$$h_{lam} = \frac{k}{l_{ch}} Nu_{lam} = \frac{0.664 k \sqrt{Re}\, \sqrt[3]{Pr}}{l_{ch}} \tag{113}$$

بما أن ظروف التدفق، وخصوصاً في منطقة الانتقال من الطبقة الحدودية الصفحية إلى الطبقة الحدودية الاضطرابية، غالباً ما تكون جزئياً صفحياً وجزئياً اضطرابياً (بسبب العوائق الصغيرة على السطح أو بسبب الحواف غير الحادة للألواح)، يوصي الإصدار

السادس من (VDI-Wärmeatlas) 1991، لقيم $10^1 < \mathrm{Re} < 10^7$ (أي $0.13 \times 10^{-3}\ \mathrm{m\ s^{-1}} < w < 1.33 \times 10^{2}\mathrm{m\ s^{-1}}$، باستخدام متوسط عدد نوسبيلت (ومعامل الانتقال الحراري):

$$\sqrt{Nu_{fc}} = \overline{Nu_{lam}^2 + Nu_{tur}^2} \qquad (114)$$

$$h_{fc} = \sqrt{\left[\frac{0.664\,k\sqrt{Re}\ \sqrt[3]{Pr}}{l_{ch}}\right]^2 + \left[\frac{0.037\,Re^{0.8}\,Pr\,k}{l_{ch}\left(1 + 2.433\,Re^{-0.1}\left(\sqrt[3]{Pr^2} - 1\right)\right)}\right]^2} \qquad (115)$$

7-2-3-5 الانتقال الحراري للتركيب المؤلَّف من الحمل الحراري الطبيعي والقسري

بالنسبة إلى سرعات الرياح، فإن تدفق الحرارة بالحمل الحراري الطبيعي يفوق ذلك المتسبب بالحمل الحراري القسري. ولأن السكون الكلّي يحدث تحت ظروف استثنائية فقط، فإن تدفق الحرارة بالحمل الحراري القسري لا يمكن إهماله في معظم الأوقات. والوضع المذكور في المراجع العلمية للتعامل مع كِلا النوعين من الحمل الحراري بشكل مستقل لا يمكن اتباعه. المقترح المطور من النتائج التجريبية مقدم من قِبَل شيرشل (Churchill, 1977). . للحالة التي يتساوى فيها الحملان الحراريان الطبيعي والقسري في الاتجاه نفسه، فإن المعادلة الآتية تعتبر صالحة:

$$Nu = \sqrt[3]{Nu_{fc}^3 + Nu_{nc}^3} \qquad (116)$$

وللحالة التي يكون فيها الحملان الحراريان الطبيعي والقسري في اتجاهين متضادين، فإن المعادلة الآتية تعتبر صالحة:

$$Nu = \sqrt[3]{\left|Nu_{fc}^3 - Nu_{nc}^3\right|} \qquad (117)$$

للتطبيق في المجمِّعات الشمسية والمنظومات الشمسية، تم

تطوير المعادلات الآتية. يقترح (Duffie [et al.] 1974) معامل الانتقال الحراري الحملي المشترك الآتي:

$$h_{nc+fc} = h_{conv} = 5.7 + 3.8w \qquad (118)$$

حيث h_{ne+fc} معامل الانتقال الحراري الحملي ($Wm^{-2}K^{-1}$) وw سرعة الرياح (m).

وقام (Hart [et al.] 1982) بمعالجة مستقلة للتدفقات الحرارية الحملية في الجانب الأمامي للمنظومة والجانب الخلفي للمنظومة. ويقترح هذا المرجع المعاملين الآتيين للانتقال الحراري:

$$h_{F,conv} = 1.247\sqrt[3]{(T_F - T_A)\cos\gamma_M} + 0.2658w \qquad (119)$$

$$h_{B,conv} = 1.079\sqrt[3]{(T_B - T_A)\cos\gamma_M} + 0.825w \qquad (120)$$

حيث:

$h_{F,conv}$: معامل الانتقال الحراري الحملي للجانب الأمامي ($Wm^{-2}K^{-1}$).

$H_{B,conv}$: معامل الانتقال الحراري الحملي للجانب الخلفي ($Wm^{-2}K^{-1}$).

T_F: درجة حرارة سطح الجانب الأمامي للمنظومة (K).

T_B: درجة حرارة سطح الجانب الخلفي للمنظومة (K).

w: سرعة الرياح (ms^{-1}).

Υ_M: زاوية ارتفاع المنظومة الفولتضوئية.

التدفقات المائلة على الألواح: على العكس من حالات التدفق الموازية والرأسية على الألواح، فإن عدداً قليلاً فقط من المراجع العلمية تتعامل مع التدفقات المائلة على الألواح. فبالإضافة إلى المعرفة الصحيحة للبنية التركيبية للوح، فإن المعرفة الدقيقة لاتجاه التدفق تعتبر مهمة أيضاً. وحيث إنه في معظم الأحوال لا تتوافر بيانات أرصادية بذلك، تُستخدم المعادلات (118) ـ (120) المذكورة أعلاه.

7-2-4 حساب النموذج

الهدف من حساب النموذج هو إيجاد درجة حرارة الخلية T_C، التي يتم حسابها أولاً عن طريق حساب التدفق الحراري المُدخل ومن ثم بإجراء توازن بين التدفق الحراري المُدخل والتدفق الحراري المُخرَج. وحيث إن التدفق الحراري المُخرَج دالة لاخَطِّية في درجتي حرارة السطحين الأمامي والخلفي (T_F وT_B)، فإنه يجب حسابها بطريقة التكرار.

للحالة المستقرة (أي إن التدفق الحراري المُدخل يساوي تبدد الحرارة إلى الوسط المحيط)، يحدث التدفق الحراري المُخرَج بالانتقال الحراري وعن طريق تبادل الإشعاع الحراري مع السماء (الجانب الأمامي للمنظومة) ومع الأرض (الجانب الخلفي للمنظومة).

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{nc} + \dot{Q}_{rad} \qquad (121)$$

$$\dot{Q}_{nc} = h_{nc_F} A_F (T_F - T_A) + h_{nc_B} A_B (T_B - T_A) \qquad (122)$$

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \varepsilon_F A_F (T_F^4 - T_{Sky}^4) + \sigma \varepsilon_B A_B (T_B^4 - T_G^4) \qquad (123)$$

حيث:

Q_{nc}: التدفق الحراري بالحمل الحراري الطبيعي (W).

Q_{rad}: التدفق الحراري بالإشعاع الحراري (W).

h_{ncF}: معامل الانتقال الحراري للحمل الطبيعي في الجانب الأمامي ($Wm^{-2}K^{-1}$).

h_{ncF}: معامل الانتقال الحراري للحمل الطبيعي في الجانب الخلفي ($Wm^{-2}K^{-1}$).

ε_F: الانبعاثية الحرارية للسطح الأمامي للمنظومة.

ε_R: الانبعاثية الحرارية للسطح الخلفي للمنظومة.

$A_R = A_F$: مساحة السطح الأمامي والخلفي للمنظومة (m^2).

T_A: درجة حرارة الوسط المحيط (K).

T_F: درجة حرارة سطح الجانب الأمامي للمنظومة (K).

T_B: درجة حرارة سطح الجانب الخلفي للمنظومة (K).

T_{Sky}: درجة حرارة السماء (K).

T_G: درجة حرارة الأرض (K).

بالرغم من أن الخلايا الشمسية ذات الغشاء السميك أصبحت تُجهّز كثيراً بمزايا للامتصاص الكلي للإشعاعية الساقطة (انظر مثلاً (Morf, 1990)، إلاّ أن جزء الإشعاعية المنعكس نحو الخارج من الجهة الخلفية للخلية ينبغي ألا يؤخذ في الاعتبار. وللخلايا الشمسية ذات الغشاء الرقيق، فإن جزء الإشعاعية النافذ خلال المنظومة يجب أن يُطرح من طاقة التدفق الساقطة.

برامج المحاكاة الحاسوبية المتوافرة بشكل شائع لتحليل الدوائر الكهربائية مثل برنامج SPICE (Simulation Program with

(Integrated Circuit Emphasis «برنامج محاكاة مع التركيز على الدوائر المتكاملة» يمكن استخدامها لإيجاد قيمة T وحساسية عواملها عند تحويل القيم الحرارية إلى القيم الكهربائية المناظرة لها، كما هو مبيّن في الجدول (7–6).

الجدول (7–6): التناظر بين العوامل الحرارية والكهربائية

الحرارية		الكهربائية	
العامل	الوحدة	العامل	الوحدة
درجة الحرارة T	K	فرق الجهد الكهربي V	V
الحرارة Q	J	الشحنة الكهربية Q	Cb $\triangleq$ AS
التدفق الحراري	W	التيار الكهربي I	A
الموصلية الحرارية k	$(Wm^{-1}K^{-1})$	الموصلية الكهربية σ	S $\triangleq$ AV^{-1}
المقاومة الحرارية R_k	$(Wm^{-2}K^{-1})$	المقاومة الكهربية R	Ω $\triangleq$ VA^{-1}
السعة الحرارية mc_p	JK^{-1}	السعة الكهربية C	F $\triangleq$ AsV^{-1}

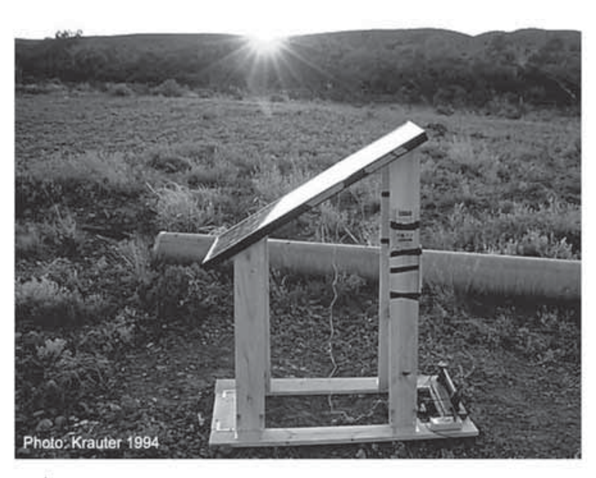
لوضوح الصورة التخطيطية، يتم تشكيل المقاومة الحرارية بالتوصيل المتوالي لمقاومات (انظر Fuentes, 1985). وينتهي هذا التوصيل المتوالي بانتقال حرارة الإشعاع، والحمل، والتوصيل إلى الوسط المحيط المتمثل بالمقاومات المعتمدة لاخطياً على درجة الحرارة والمتصلة بالأوساط المحيطة (درجة حرارة السماء، ودرجة حرارة الوسط المحيط).

7–2–5 التحقق من صحة النمذجة الحرارية

خلال زيارة بحثية لما بعد الدكتوراه للمؤلف في جامعة نيو ساوث ويلز (UNSW) في سيدني بأستراليا تم التحقق من صحة النماذج المذكورة أعلاه تجريبياً. إذ تم تركيب المنظومة BP 255 بطريقة معزولة حرارياً باستخدام زاوية ارتفاع 30º نحو الشمال (انظر الشكل (7–23)). كما لم يتم إعاقة الحمل الحراري الطبيعي بواسطة معوّقات. وفي الجانب الخلفي للمنظومة الفولتضوئية (المكوّن من التصفيح زجاج ـ EVA ـ خلايا سليكونية ـ EVA ـ تيدلر ـ بوليستر ـ تيدلر)، تم إضافة مجسّي درجة حرارة Pt100. وأُجريت قياسات درجة حرارة الوسط المحيط باستخدام ترمومترين مستقلين في منطقة الظل للمنظومة. وتم

قياس سرعة الرياح بواسطة مقياس بالغ الدقة لتدفق الهواء عند أعلى المنظومة. إضافة إلى ذلك، فقد تم قياس تيار دائرة القِصَر، وجهد الدائرة المفتوحة، والخرج الأقصى للطاقة الكهربائية.

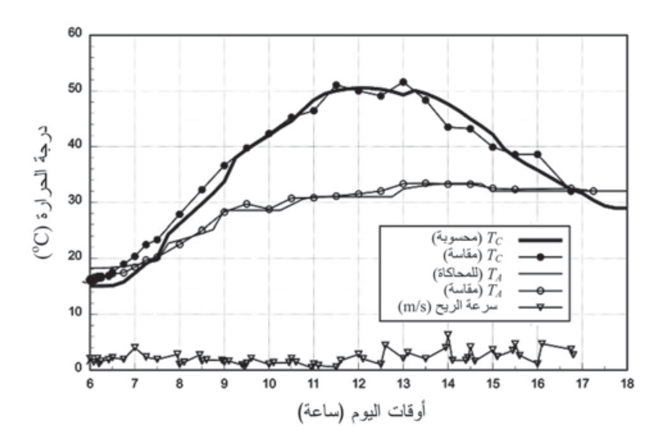
كانت الفروق بين توقعات المحاكاة وبيانات القياسات الفعلية منخفضة من حيث درجات حرارة الخلية وتجاوزت حزاماً مسموحاً به 1.5 K ± فقط عندما كانت سرعة الرياح الفعلية مختلفة جداً عن الثابت 2 m/s المستخدم في برنامج المحاكاة (انظر الشكل (7–25)).



الشكل (7-24): نظام تجريبي للتحقق من صحة النمذجة الحرارية والمثالية في محطة أبحاث جامعة نيو ساوث ويلز عند الشروق (لمنطقة فولدرز جاب (Foulders Gap) بأستراليا 31^{o} S، 140^{o} E). واضح تماماً الفقد البصري العالي الناتج عن انعكاس السقوط المستوي للجزء المباشر للإشعاعية.

7–3 النمذجة الكهربائية

استخدم للنمذجة الكهربائية للخلايا الشمسية ما يسمى «نموذج الدايود الواحد» (انظر مثلاً (Green 1995) أو (Lund [et al.] 1987). يخدم هذا النموذج البسيط نسبياً لإيجاد القدرة الكهربائية المُخرَجة للمنظومة الفولتضوئية كدالة في الإشعاعية، وزاوية السقوط، والكفاءة الطيفية، ودرجة حرارة الخلية، والحِمل.



الشكل (7-25): مقارنة درجة الحرارة المحاكاة للخلية الشمسية بدرجة الحرارة الفعلية المقاسة خلال اليوم (منطقة فولدرز غاب في أستراليا، 21 آذار/ مارس 1994، سماء صافية).

7-3-1 التيار

تيار دائرة القِصَر I_{sc} يعطى بالمعادلة الآتية:

$$I_{sc} = \int_0^{\frac{\pi}{2}}\int_0^{\infty} E(\lambda,\theta_{in})\cdot\tau\left(\tau_i(d_i,n(\lambda,T_i),\theta_i)\right)\cdot s(\lambda,T_C,\theta_i,E)\,d\lambda\,d\theta_{in} \quad (124)$$

حيث:

I_{sc}: تيار دائرة القِصَر (A).

$E(\lambda,\theta_{in})$: الطيف الشمسي الأرضي كدالة في زاوية السقوط (W/m^2).

$\tau(\tau_i(d_i,n(T_i,\lambda),\theta_i))$: النفاذية البصرية للتغليف.

$\tau_i(d_i,n(T_i,\lambda),\theta_i)$: النفاذية البصرية للطبقة i.

$n(T_i,\lambda)$: معامل الانكسار البصري للطبقة i.

$s(\lambda,T,\theta_i,E)$: الحساسية الطيفية للخلية (A/W).

E : الإشعاعية (W/m^2).

d_i : سماكة الطبقة i (m).

T_i : درجة حرارة الطبقة (K).

T_C : درجة حرارة الخلية (K).

λ : الطول الموجي للإشعاعية (nm).

θ_{in} : زاوية السقوط على سطح المنظومة (درجة).

θ_i : زاوية السقوط على الطبقة i (درجة).

النمذجة التحليلية للحساسية الطيفية الفعلية واسعة جداً وتتطلب الكثير من معاملات المادة التي لا يتم توفيرها عادة من قِبَل المنتجين. ولهذا، تستخدم النمذجة بيانات القياسات للكفاءة الطيفية.

7-3-2 المعاملات الكهربائية الأخرى

نظرية التحويل الفولتضوئي معروفة تماماً وموثقة (انظر مثلاً (Green 1995, 2000). وبما أن النمذجة الفعلية للجهد الكهربائي واسعة جداً وتتطلب من المنتجين العديد من المعاملات الداخلية، التي غالباً ما تكون صعبة الحصول بواسطة مهندس النظام الفولتضوئي، فإننا سنستخدم فكرة «الصندوق الأسود»، مستعملين البيانات المرجعية المعطاة في صحيفة المعلومات للمنظومة الفولتضوئية عند ظروف الفحص المعيارية (V_{oc}، V_{mp}، I_{sc}، I_{mp}، $TC(I)$، $TC(V)$، $TC(P)$)، وحساب الجهد الكهربائي الفعلي باستخدام درجة الحرارة المحسوبة (أو المقاسة) مع معامل درجة الحرارة. الفقد في الجهد الكهربي بسبب الإشعاعية المنخفضة يؤخذ في الاعتبار وفقاً للعلاقة اللوغاريتمية بين الإشعاعية والجهد. المعامل

($TC(I$) عادة صغير جداً، وموجب، نتيجة التحويل الفولتضوئي الطيفي الموسع في مدى الأشعة تحت الحمراء. وعامل التشكُّل FF يعتمد أيضاً على درجة الحرارة، لهذا فإن $\mathrm{TC}(P)$ غالباً ما تكون أعلى من $TC(V)$.

7-4 الحقن الشبكي للفولتضوئية

7-4-1 نمذجة العاكسات

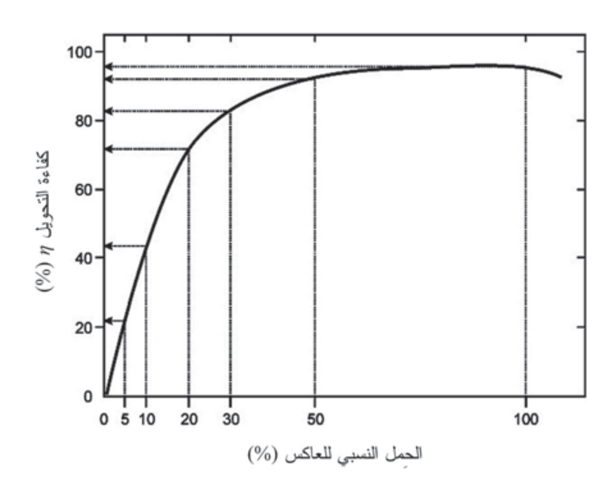
العاكسات المتصلة بالمنظومات الفولتضوئية لا يتم تشغيلها بطاقتها الاسمية في جميع الأوقات؛ واعتماداً على ظروف الطقس الفعلية وساعات اليوم، فإن القدرة المُدخلة قد تكون أقل كثيراً من القدرة الاسمية. وحيث إن كفاءة التحويل للعاكسات تقل عند تشغيلها بأقل من القدرة الاسمية، فإن جميع النقاط الممكنة للتشغيل يجب أن تؤخذ في الاعتبار وإيجاد القيمة التي تعكس الكفاءة النموذجية للعاكس لفترة طويلة من الزمن (انظر الشكل (7-26)). هذه القيمة هي «الكفاءة الأوروبية» (European Efficiency) η_{Euro}، التي تعطي حساب الظروف الأوروبية النموذجية ومردودات الفولتضوئية، وتعطى على النحو الآتي:

$$\eta_{Euro} = 0.03\eta_{5\%} + 0.06\eta_{10\%} + 0.13\eta_{20\%} + 0.1\eta_{30\%} + 0.48\eta_{50\%} + 0.2\eta_{100\%} \quad (125)$$

للمثال الموضح أعلاه، ستكون 83.6 في المئة.

تعتمد خصائص الكفاءة للعاكس على التقنية المستعملة. للتقليل من كفاءة التحويل المنخفضة في الأحمال الصغيرة تُستخدَم أحياناً عاكسات متعاقبة: للأحمال الصغيرة، يُستخدَم فقط عاكس واحد صغير يعمل قريباً من قدرته الاسمية، وعندما يزداد الحِمل يتم وصل

عاكس آخر. والفقد في الاستهلاك الذاتي للوحدة، المستقلة عن الحِمل، يجب أن يؤخذ في الاعتبار أيضاً. ويحدث الحقن الشبكي عندما يكون توليد الفولتضوئية أعلى من الفقد في الاستهلاك الذاتي فقط. للتقليل من الفقد في الاستهلاك الذاتي، يتم في أغلب الأحيان قطع العاكسات آلياً خلال النهار.



الشكل (7-26): الكفاءة كدالة في الحِمل النسبي لعاكس للحقن الشبكي الكهربائي، مع نقاط التشغيل المتعلقة بإيجاد "الكفاءة الأوروبية".

الطريقة الأخرى لنمذجة معاملات العاكس الكهربائي مقترحة من قِبَل (Schmid 1994). وقد تم نمذجة خصائص الكفاءة للعاكس بواسطة ثلاث معاملات (k_0، k_1، k_2) كالآتي:

$$\eta_{inv} = \frac{p_{out}}{p_{out} + k_0 + k_1 p_{out} + k_2 p_{out}} \quad , \quad p_{out} = \frac{P_{out}}{P_{rated}} \qquad (126)$$

حيث:

k_0: معامل الفقد للاستهلاك الداخلي.

k_1: معامل الفقد للجهد الكهربي.

k_2: معامل الفقد للمقاومة.

η_{inv}: الكفاءة الفعلية للعاكس.

P_{out}: الطاقة المُخرَجة الفعلية للعاكس (W).

P_{rated}: طاقة الخرج القصوى المصنَّفة للعاكس (W).

وكانت الدراسة التي أُجريت بواسطة جانتش وآخرون (Jantsch [et al.] 1992) على 35 عاكساً مختلفاً متوفر تجارياً قد أدت إلى القيم المتوسطة الآتية للمعاملات الثلاثة: $k_0 = 0,01$; $k_1 = 0.025$; $k_2 = 0.08$.

7-4-2 العوامل المحدِّدة لتصميم محطات القدرة الفولتضوئية

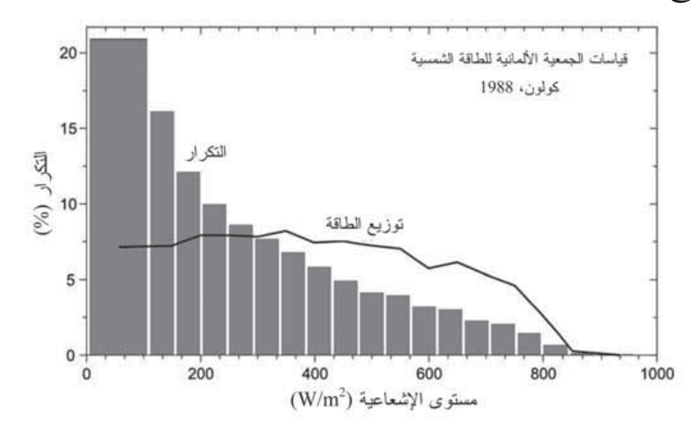
بشكل عام، يمكن تشغيل محطات القدرة الفولتضوئية في أيّ موقع مُضاء، حتى في الفضاء. ولا يوجد حد تقني أعلى لحجم بنية المنظومة إذا أُخِذ في الاعتبار الجهد الكهربي الأقصى للإشعاع الشمسي للمنظومات (600 V بشكل عام). وبشكل أساسي، هناك عاملان يحددان إمكانيات التوسع المعقول:

- المواقع الملائمة.
- الطلب على الطاقة الكهربائية.

اعتبارات دمج محطات القدرة الفولتضوئية الكبرى في النظام الشبكي الكهربائي الموجود وحدوده من أجل توسيع سعة التوليد الفولتضوئي يمكن إيجاده في (Tzschoppe 1994). وقد تم التوضيح لحالة ألمانيا بأن توسيع سعة التوليد الفولتضوئي بواسطة محطات القدرة الفولتضوئية الموزعة لا يسبب أيّ مشكلة لاستقرارية الشبكة حتى حدود الجيجاوات. إلاّ أن الصعوبات تحدث عندما تصل الفولتضوئية إلى ما بين 15 في المئة ـ 20 في المئة من طاقة التوليد الكلِّية.

7-5 مخططات النظام

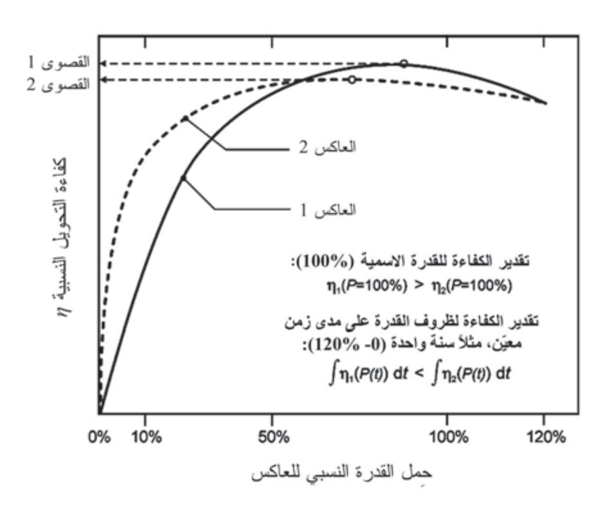
تكون الطاقة التي يتم توفيرها بواسطة موارد الطاقة المتجددة، مثل الطاقة الشمسية، متقلبة نتيجة ظروف الطقس والمناخ. يبيّن الشكل (7-27) توزيع الطاقة والتكرار للإشعاعية الشمسية لمثال مدينة كولون (Cologne) في ألمانيا. كان إسهام مستوى الإشعاعية المرجعية البالغ $1000\ W/m^2$ لظروف الفحص المعيارية منخفضاً جداً، بالرغم من أن معظم الإشعاعية الشمسية في كولون تحدث عند مستويات تتراوح بين $180\ W/m^2$ و$500\ W/m^2$.



الشكل (7-27): التكرار وتوزيع طاقة الإشعاعية الشمسية لمثال مدينة كولون بألمانيا في عام 1988 (بيانات الجمعية الألمانية للطاقة الشمسية، برلين، ألمانيا، 1995).

وحيث إن مستويات الإشعاعية البالغة $1000\ W/m^2$ تحدث نادراً (على الأقل في وسط أوروبا)، يوصى بتصميم القدرة القصوى للعاكس الكهربائي بحيث لا تكون مساوية للقدرة الاسمية المُخرَجة للمولد الفولتضوئي تحت ظروف الفحص المعيارية ($E = 1000\ W/m^2$، و1.5 AM، و$T_M = 25\ ^oC$)، ولكن مخفضة بمعامل خفض. ومردود الطاقة الكهربائية الأقصى على مدى سنة للعاكسات الشائعة يمكن إحرازه لمعاملات خفض بين 0.65 و0.8 لحالة شمال أوروبا؛

وبين 0.75 و0.9 لحالة وسط أوروبا؛ وبين 0.85 و1.0 لحالة جنوب أوروبا وشمال أفريقيا (انظر (Macagnan 1992).



الشكل (7-28): كفاءة التحويل النسبية فقط كدالة في الحِمل النسبي لنوعين مختلفين من العاكسات: فبينما يعطي العاكس 1 كفاءة تحويل قصوى فقط عند الحِمل الاسمي، يعطي العاكس 2 كفاءات عالية لمدى واسع من الأحمال.

توسيع السعة والديناميكية ـ تتميز منحنيات الكفاءة مقابل الحِمل لمعظم المكونات في النظام الفولتضوئي بخاصة الخفض الكبير لكفاءة التحويل عندما تكون ظروف التشغيل بعيدة عن الظروف المعيارية. وفي الواقع، يحدث هذا بشكل متكرر (انظر الشكل (7-28))، ما يؤدي إلى كفاءة نظام مخفضة بشكل كبير، يتم تضخيمها بواسطة التوصيل «المتسلسل» للمكونات. وهذا يؤدي إلى سعة أعلى لتقلبات القدرة الكهربائية المُخرَجة مقارنة بتقلب وسعة الطاقة المُدخلة بواسطة الإشعاعية. ولهذا، يجب أن يكون النظام قادراً على التعامل مع المدى الديناميكي الموسع فوق ذلك المقدم بواسطة المدى الديناميكي للإشعاعية المُدخلة. ولمعظم مكونات الأنظمة الفولتضوئية كفاءة تحويل مخفضة

عندما لا تتوافق ظروف التشغيل مع ظروف الفحص المعيارية.

في أغلب الأحيان، يمكن تحسين مكونات النظام لعامل واحد فقط، على سبيل المثال، أقصى كفاءة بقدرة كهربائية مصنَّفة أو أقصى متوسط كفاءة لمدى ديناميكي معيّن. وتكبير المدى الديناميكي يمكن إجراؤه من دون أيّ انخفاض في الكفاءة القصوى بصعوبة، ما يخفض متوسط الكفاءة للمدى الديناميكي أيضاً. وتقسيم مكون واحد ذي قدرة عالية ببساطة إلى عدد من المكونات الصغيرة (تعاقب) يمكن أن يكون مساعداً. أما بالنسبة إلى مستويات الحِمل المنخفضة، فإن مكوّناً واحداً فقط يكون في حالة تشغيل ـ وبالنسبة إلى الأحمال الأعلى يتم وصل مكونات إضافية بالتوازي. التجارب على هذا النوع من التشغيل تم إجراؤها للعاكسات (انظر أعلاه) ولمضخات المياه.

7-6 المردود الكهربائي لنظام مرجعي

بالأخذ في الاعتبار جميع آليات الفقد المشروحة في النماذج أعلاه، يتم تحقيق المردودات الكهربائية المبيّنة في الجدول (7-7). القيم المقترحة من قِبَل (Staiβ 1997) تستند إلى نظام فولتضوئي مرجعي بخلايا شمسية سليكونية متعددة البلورة وكفاءة منظومة 12 في المئة، تم تنصيبه في جنوب ألمانيا (ميونيخ).

الجدول (7-7): المردود الكهربائي لأنظمة فولتضوئية (η_{STC} = 12%) للحقن الشبكي في ألمانيا.

القدرة للنظام الفولتضوئي (kW_p)	مردود التيار المتردد لقدرة محددة (kW_p)	مردود التيار المتردد لمساحة محددة kwh (am^2)
1 إلى 5	784	94.1
50 إلى 150	859	103.1
300 إلى 700	887	106.4

الفصل الثامن

الطاقة المُدخَلة عن طريق الإزالة وإعادة التدوير

بينما يقدِّم في أغلب الأحيان أحد المراجع العلمية دراسة لعملية الإنتاج (Aulich [et. al.], 1986)، و(Hagedorn, 1989)، يُجري مؤلف علمي آخر دراسة مفصلة للمردودات الكهربائية في أثناء التشغيل (Krauter [et. al.], 1993c . . . إلخ). وتقدم مراجع أخرى تحسينات الإنتاج والمردود (مثلاً، Green [et, al.] 1995)، و(Krauter [et, al.] 1996a). إلاّ أنه من الصعب إيجاد دراسة متكاملة تتعلق بالطاقة وثاني أكسيد الكربون تغطي جميع التأثيرات المذكورة أعلاه في دورة حياة كاملة، بما في ذلك إعادة التدوير.

المراجع العلمية عن إعادة التدوير غالباً ما تستند إلى قطاعات صناعية أخرى بدلاً من الفولتضوئية، إلاّ أنه يمكن تقريبها من خلال تبنّي مكونات مكافئة للمادة.

8-1 فصل المواد

قام (Bruton [et al.]m 1994) بمقارنة مختلف طرق فصل مكونات مادة المنظومة الفولتضوئية من حيث إمكانيات إعادة تدويرها:

- **فصل التصفيح ميكانيكاً:**

تؤدي هذه الطريقة إلى تدمير الخلايا، ويمكن فقط فصل رقاقات

الجانب الخلفي المصنوعة من التيدلر ـ البوليستر ـ التيدلر عن طريق تسخينها بعناية بواسطة مسدس هواء ساخن.

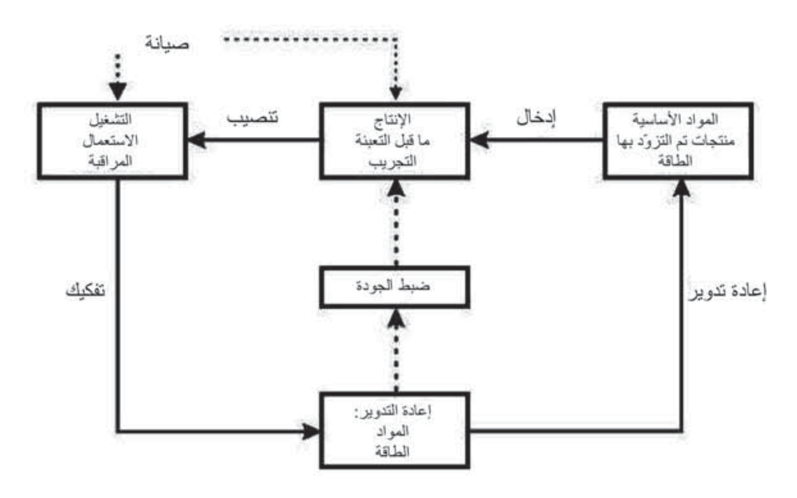
- **فصل التصفيح حرارياً:**
يؤدي تسخين التصفيح إلى درجة حرارة 200ºC إلى تكربن الأسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين، ويجعل شرائح السليكون غير قابلة للاستخدام. وقدمت شركة جيرمان سولار (German Solar) طريقة جديدة في عام 2003/ 2004 تستند إلى فصل التصفيح حرارياً، كما إن هذه الطريقة تستطيع استعادة الخلايا الشمسية ـ تفاصيل هذه العملية ظلت سرية.

- **فصل التصفيح كيميائياً:**
تم اختبار محاليل مختلفة، إلاّ أن كلها أدت إلى انتفاخ طبقة الاسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين، ما تسبب بتكسر شرائح السليكون.
استطاع محلول الصودا الكاوية إضعاف التلاصق بين الاسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين والزجاج فوق المساحات التي من دون خلايا، إلاّ أنه لوحظ أن التلاصق بين الخلايا، واسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين، والزجاج لم يضعف كثيراً.
وأخيراً، حمض النيتريك (HNO_3، عامل تآكل، قابل للاشتعال) استطاع أن يذيب اسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين عند درجة حرارة 80ºC إلى 100 ºC وأدى إلى انفصال الخلايا الشمسية عن التركيب. التفاعل الكيميائي كان على النحو الآتي:

$$6HNO_3 + CH_2 \Rightarrow 4H_2O + CO_2 + 6NO_2$$

تم تنظيف الخلايا الشمسية المعاد تدويرها بالصودا الكاوية، وقد أعيد صقلها في شركة BP Madrid. حققت الخلايا المعادة تدويرها جهد الدائرة المفتوحة نفسها وعامل التعبئة نفسه كما للخلايا المرجعية، إلاّ أن تيار دائرة القِصَر كان أقل بمقدار 20 في المئة، والذي يمكن تفسيره بالبنية السطحية المخفضة. كانت تكلفة عملية

إعادة التدوير محددة بـ 0.56 يورو لكل تذبذب (ولكل خلية) للمنظومة BP 255. ولم يتم إجراء تحليل للطاقة، ولكن وفقاً للتكاليف، فإن إنفاق الطاقة افتُرِض بأنه على الأقل أدنى بعامل عشرة من ذلك المحدد لإنتاج خلية جديدة.



الشكل (8-1): مخطط لتدفقات الطاقة والمعلومات في دورة حياة النظام الفولتضوئي، مع الأخذ في الاعتبار إعادة التدوير (تدفقات الطاقة ممثّلة بالخطوط الكاملة، وتدفقات المعلومات بالخطوط المتقطعة).

8-2 الطاقة المُدخَلة بواسطة إعادة التدوير

يبيّن الجدول (8-1) إمكانية توفير الطاقة باستخدام مواد معاد تدويرها (مواد ثانوية) من أجل الإنتاج. ويوضح الجدول (8-2) من قِبَل هوتّي (Hütte, 2000) الحصص النسبية لإعادة التدوير المنفَّذة فعلياً، وهي غالباً كبيرة جداً. اللافت هو إمكانية التوفير العالية باستخدام الألمنيوم الثانوي. وبالرغم من أن إنتاج الألمنيوم الأساسي يتطلب طاقة تبلغ حوالى عشرة أضعاف إنتاج الفولاذ الأساسي، إلاّ أن الألمنيوم المعاد تدويره له متطلب طاقة يساوي ذلك الذي للفولاذ

الجديد. ولهذا أثر كبير في توازن طاقة المنظومات الفولتضوئية المجهزة بأطر من الألمنيوم. لسوء الحظ، بيانات استخدام الألمنيوم الثانوي نادراً ما تتوافر من قِبَل مصنّعي المنظومات لدرجة أن التأثير على توازن الطاقة لا يمكن تطبيقه نتيجة لذلك في الحسابات.

الدراسات التي أجراها إنجيلينبرغ وأخرون (Engelenburg [et al.], 1995) على منظومات فولتضوئية مصنوعة من السليكون الأمورفي بيّنت أنه بعد فصل التصفيح، يكون الزجاج الأمامي للمنظومة مناسباً كزجاج أبيض معاد تدويره إذا ظل مساهمة زجاج المنظومة أقل من 5 في المئة، أو مناسباً بشكل كامل كزجاج ملون بصرف النظر عن مساهمة زجاج المنظومة في المادة المذابة.

الجدول (8-1): خفض استهلاك الطاقة لإنتاج المواد بواسطة إعادة التدوير.

المادة	الطاقة للمادة الأساسية (جديدة من المادة الخام) MJ/kg	الطاقة للمادة الثانوية (100 ٪ إعادة تدوير) MJ/kg	خفض متطلب للطاقة بإعادة التدوير ٪	المرجع
ألمنيوم (صفيح)	190	30	84.2	(Ebersberger, 1995)
ألمنيوم (أدنى)	160	12	92.5	(Hütte, 2004)
ألمنيوم (أقصى)	240	20	91.7	(Hütte, 2004)
ألمنيوم	142	16	88.7	(Frischknecht 1996)
فولاذ (أدنى)	16	10	37.5	(Hütte, 2004)
فولاذ (أقصى)	27	18	33.3	(Hütte, 2004)
نحاس	95	26	72.6	(Wagner, 1995a
زجاج	10.8	3.6	66.6	قاعدة بيانات 1995
ورق	79.2	18	77.3	قاعدة بيانات 1995

قاعدة البيانات لحسابات النحاس كانت Wagner, 1995a، و(Kaltschmitt 1995)، و (Fritsche 1989).

الجدول (2-8): الحصص النسبية لإعادة تدوير مواد مختلفة.

المادة	الاستهلاك العالمي عام 1983 (10^6 طن) (Hornbogen 1994)	حصة إعادة التدوير في الغرب عام 1983 ((Hornbogen 1994) (٪)	حصة إعادة التدوير في ألمانيا (Hütte,) (2000) (٪)	حصة إعادة التدوير في ألمانيا (Kaltschmitt, 2003)) (٪)	حصة إعادة التدوير في ألمانيا (Hütte,) (2004) (٪)	حصة إعادة التدوير في ألمانيا (D) والاتحاد الأوروبي (EU) (الجمعية التجارية، الاتحاد الأوروبي، Aluinfo (2000
حديد، فولاذ	650.80	29.2	55	40	49.7 ـ 35.8	
ألمنيوم	16.35	26.7	27	63	35 ـ 31	الهندسة الكهربائية: 87 (D) 80 (EU)الهندسة الميكانيكية: 83 (D) 80 (EU) التعبئة: 72 (D) 40 (EU)
نحاس		40.2		56	54.6 ـ 48.3	
زنك	5.42	25.1			40.2 ـ 34.9	
رصاص	3.99	43.9			59.9 ـ 45	
قصدير	0.18	16.7				
زجاج			45			
ورق			35		90	
بلاستيك			10		60	



الفصل التاسع

توازن الطاقة الكلِّية

ما تم أخذه في الحسابات هو الطاقة الداخلة والخارجة وتدفقات المادة في أثناء إنتاج، وتشغيل، وتفكيك (وإعادة تدوير) محطة القدرة الفولتضوئية. الطاقات المتأصلة لتدفقات المادة يجب أخذها في توازن الطاقة وثاني أكسيد الكربون.

لإيجاد ما يسمى استهلاك «الطاقة الرمادية» المتأصلة، هناك طريقتان معروفتان: طريقة الطاقة المُدخَلة ـ المُخرَجة استناداً إلى جداول مُدخَلات ومُخرَجات للاقتصاد الكلّي، وطريقة التحليل للعمليات المتتالية ـ «تحليل سلسلة العملية». نقوم في هذا الكتاب بإجراء تحليل لسلسلة العملية الأكثر دقة قدر الإمكان. وفي حال عدم وجود بيانات كافية متوافرة للعمليات لتحليلها (مثلاً، الخدمات)، سيتم إجراء تحليل للمُدخَلات والمُخرَجات.

9-1 إنفاق الطاقة المتراكِمة

تعريف:

«إن إنفاق الطاقة المتراكِمة (Cumulated Energy Expense (*CEE*)) يعطي حساب الإنفاق الكلي للطاقة المصروفة في إنتاج، واستعمال، والتصفية النهائية للجسم، ويمكن أن يكون هذا الإنفاق للطاقة ناتجاً عن أسباب أخرى مرتبطة بالجسم. وفقاً لذلك، فإن

انفاق الطاقة الكلي هو مجموع إنفاقات الطاقة المتراكِمة للإنتاج (CEE_P)، والاستعمال (CEE_U)، والتصفية النهائية (CEE_L)».

(Hagedron, 1990)

في أثناء استعمال جسم، ينشأ استهلاك الطاقة أيضاً نتيجة لصيانة وتوفير قطع الغيار، إذا لزم الأمر. والتخلص الآمن بيئياً للجسم المستهلَك قد يؤدي أيضاً إلى إنفاقات إضافية للطاقة. وإذا تم إعادة استخدام أو إعادة تدوير المكونات، فإن هذا يمكن أن يؤدي إلى قيمة دائنة في رصيد إنفاق الطاقة (استهلاك سالب).

تعتبر قيمة إنفاق الطاقة المتراكِمة مهمة من أجل التصنيف البيئي للمُنتَج. وللسماح بمقارنة المُنتَج بمنتجات أخرى، يجب أن يكون هناك وضوح تام كيف سيتم استعمال المُنتَج وعلى ماذا قد تم إدخال حسابه.

يجب الإشارة أيضاً فيما إذا كانت القيم تمثل إنفاقات طاقة أساسية أو مستهلَكة. إذا كان إنفاق الطاقة المتراكِمة معطى كإنفاق طاقة أساسية، يجب عندئذ أخذ كفاءات التحويل الفعلية لمحطات القدرة المشاركة في توليد الطاقة المستهلَكة. ويقترح **هيجدورن** الكفاءات الآتية، التي يمكن استخدامها أيضاً في الحسابات المبينة أدناه:

الطاقة الكهربائية: متوسط الكفاءة لمحطات القدرة في ألمانيا هي 0.35، ولمحطات القدرة الحديثة قد تصل إلى 0.4.

الوقود: استهلاك حاملات الطاقة المستهلَكة كوقود تؤخذ في الحسابات باستخدام كفاءة مقدارها 0.85.

الاستهلاك غير الطاقي: «الاستهلاك غير الطاقي» هو استخدام حاملات الطاقة كمواد خام وليس كوقود (مثلاً، النفط المعدني المستخدم لتصنيع البلاستيك)، أي عدم استخدام

محتوى طاقتها المتأصل بالإحراق. وإذا لم تُعطَ بيانات إضافية، فإن الاستهلاك غير الطاقي يؤخذ في الحسابات باستخدام كفاءة مقدارها 0.80.

2-9 نماذج لتوازنات الطاقة

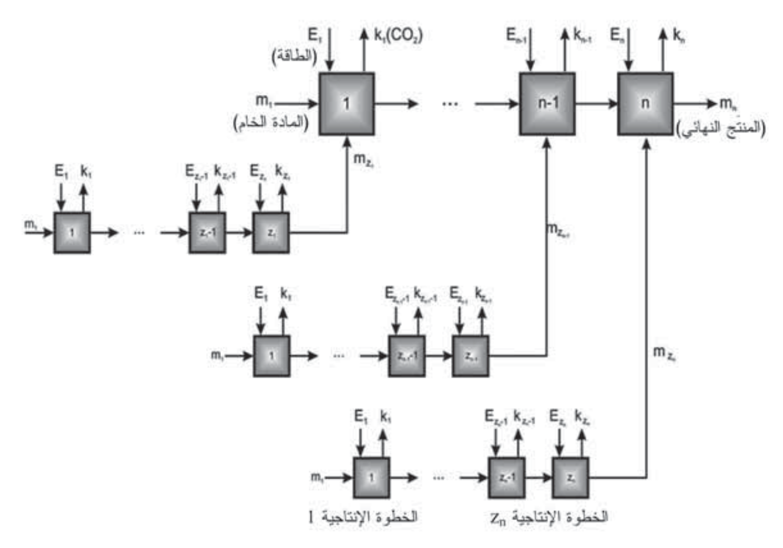
عند إجراء توازن الطاقة، يقوم حساب الحدود الفاصلة للنظام بدور مهم جداً في نتائج التحليل. الحدود الفاصلة للنظام، التي ترتبط بالطريقة، تسمى أيضاً «حدود رأسية»؛ والحدود التي تتعامل مع تحديد المشكلة تسمى «حدود أفقية». الحدود الأفقية قد تحصر النظام في جزء معيّن من سلسلة العملية. أما الحدود الرأسية فتحدد أيّ جزء من الاقتصاديات يمد النظام بالمواد اللازمة، والخدمات، والأجهزة. ويجب تضمين الإنفاقات والانبعاثات الآتية في توازنات الطاقة وثاني أكسيد الكربون ((Spreng, 1995)[1]:

1 ـ إنفاقات الطاقة المباشرة وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة في أثناء خطوة العملية، أو عن طريق نشاطات ذات صلة تعود للنظام. ويتضمن ذلك الوقود، والكهرباء، والاستهلاك الداخلي لحامل الطاقة الذي يتم معالجته.

2 ـ إنفاقات الطاقة غير المباشرة، بما في ذلك الطاقة والمواد المستهلَكة في أثناء العملية: الطاقة المحتواة في الأجهزة الرئيسة للنظام، شاملاً الطاقة داخل جميع المكونات المصنَّعة والطاقة المستهلَكة أيضاً مباشرة في أثناء تصنيع هذه المكونات؛ والطاقة المحتواة في الأجهزة الرئيسة اللازمة لإنتاج المواد والمكونات، شاملاً استهلاك طاقة الأجهزة المستخدَمة للإنتاج؛ والطاقة اللازمة لإنتاج الوقود

(1) يستخدم (Spreng, 1995) هذه الطريقة بالنسبة إلى توازنات الطاقة، إلاّ أن هذه الطريقة يمكن تطبيقها أيضاً بالنسبة إلى توازنات ثاني أكسيد الكربون.

والكهرباء. في بعض الأحيان، التمييز بين استهلاك الطاقة المباشر وغير المباشر ليس سهلاً. وفي مثل هذه الحالات، تعطينا مخططات تدفق النظام (مخططات سانكي (Sankey)) توضيحاً لذلك (انظر الشكل (9-1)).



الشكل (9-1): سلسلة لعملية عامة بسلسلة فرعية واحدة.

9-3 تحليل المُدخلات ـ المُخرَجات

هذه الطريقة مناسبة بشكل أساسي للتنصيبات ذات المقاييس الكبيرة جداً، مثلاً لمحطات القدرة. وارتباط النتائج محدود بالقدرة على حل أقسام جدول المُدخلات والمُخرَجات كل على حدة. على سبيل المثال، من غير الممكن عادة المقارنة بين اثنين من المنتجات الخرسانية في الوقع العملي. وبشكل جزئي، فإن شدتي الطاقة وثاني أكسيد الكربون لمنتجات وخدمات مختلفة قد تم توفيرهما على شكل جداول، أو أنه سيتم توفيرهما قريباً نتيجة إدخال المعيار ISO 14000 *ff* (انظر الملحق). ولهذين المكوّنين، بقدر ما يمكن اعتبارهما نظاماً

مغلقاً، فإن تحليل العملية المكلفة يصبح عتيقاً (Spreng, 1988).

يوضح الجدول (9-1) تحليلاً لمُدخَلات ومُخرَجات الاقتصاد الكلّي بالنسبة إلى معظم قطاعات الصناعة الرئيسة في ألمانيا.

الجدول (9-1): إسهامات التكلفة النسبية للمادة، والطاقة، والعاملين للصناعات العشرة الرئيسة (من حيث إجمالي القيمة المضافة) في ألمانيا

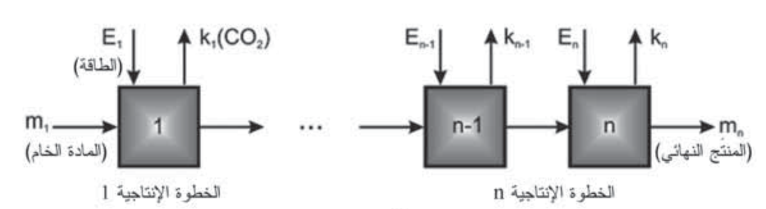
قطاع الصناعة	النسبة المئوية لمساهمة الكلفة فى الانتاج				
	المادة[1]	الطاقة	العاملون	أخرى[2]	إجمالي القيمة المضافة (مليون €)
صناعة السيارات	67.1	0.6	19.9	14.3	61,685
الهندسة الميكانيكية	46.5	0.8	33.5	18.1	58,937
الصناعة الكيميائية	47.8	2.9	21.8	27.8	41,432
التحويل إلى فحم الكوك، ومعالجة النفط الخام	56.0	0.6	2.8	39.6	40,163
صناعة الأغذية	59.4	1.7	15.1	21.8	31.401
إنتاج المنتجات المعدنية	41.1	1.5	35.3	19.2	30,276
إنتاج المولدات الكهربائية ووحدات التوزيع	51.7	0.7	30.5	17.8	27.913
إنتاج المنتجات البلاستيكية والمطاط	49.4	1.9	26.8	19.8	19.292
إنتاج ومعالجة المعادن	58.4	6.3	23.0	16.7	16,585
صناعة الطباعة، والنشر، والنسخ	25.3	1.0	41.1	29.7	15.477

(المرجع: كتاب الإحصاء السنوي لألمانيا للعام 2003).
(1) شاملاً المنتجات التموينية. (2) إيجارات، وفوائد، وخدمات أخرى.

التحديد الأولي جداً لتدفقات المادة والطاقة لأيّ مُنتَج (مثلاً، كابل كهربائي) يتم إجراؤه وفقاً لحصة التكلفة للصناعات المشاركة (على سبيل المثال، للكابل الكهربائي: الهندسة الكهربائية، وإنتاج المعدن اللاحديدي، والصناعة الكيميائية). يبيّن الجدول (أ ـ 4) في الملحق المزيد من القيم المفصلة.

4-9 تحليل سلسلة العملية

يقوم تحليل سلسلة العملية باختبار المراحل المختلفة لعملية تصنيع نظام الطاقة على شكل تحليل دقيق. ويوصَف النظام كسلسلة للعملية إذا تحققت الطاقة النهائية أو خدمة الطاقة تم تحقيقها من مصدر طاقة يمر خلال خطوات العملية المختلفة (Spring, 1995). ولكل عملية على حدة من هذه السلسلة، ينبغي عدم تحديد المُدخلات والمُخرَجات فقط، بل يجب أيضاً تحديد المواد والأجهزة كلها التي تتسبب في إنفاق طاقة مباشرة. كما يجب أيضاً تحديد والأخذ في الاعتبار النواتج الثانوية والمُخرَجات الأخرى التي تؤدي إلى إنفاقات طاقة إضافية.



الشكل (9-2): مخطط لتدفقات الطاقة، وثاني أكسيد الكربون، والمادة في سلسلة ذي عملية واحدة.

في البداية يجب تقدير استهلاك الطاقة للعملية. وهذا يعني أن جميع مُدخَلات الطاقة الأخرى، باستثناء مُدخَل الطاقة الأصلية الذي سيتم تحويله، يجب ترسيخها (مثلاً، الطاقة للانتقال الداخلي). بعد ذلك، يجب أخذ المواد، والأجهزة، وعناصر العملية، والخدمات في الاعتبار. لمعرفة شدة طاقتها، يجب إجراء تحليل لسلسة عملية من الدرجة الثانية. وتوازن الطاقة يجب حسابه ضمن حسابات العملية الأصلية. هذا الإجراء يمكن أن يؤدي إلى عدد لانهائي من الفروع التي يجب تتبعها وتحليلها؛ وفي الواقع يتم التحقق الإضافي فقط من المعاملات المهمة بدلاً من دراسة الدرجة الثانية: تظهر «شجرة عائلة» للمادة (انظر الشكل (9-1)) والتي تتفرع أكثر فأكثر. وكل فرع يصف

فراغ توازن الطاقة الخاص به، وله تاريخ خاص به، والذي يجب دراسته بشكل مستقل من حيث إنفاق الطاقة المتراكِمة والانبعاثات. وحتى ولو كان التحليل يمكن حصره ضمن حدود السلسلة الفرعية الأولى والثانية، فإن تحليل سلسلة العملية يتطلب الكثير من العمل.

بصرف النظر عن الاختيار لعملية تصنيع نموذجية، يتطلب الكثير من البيانات، التي عادة ما يتم الحصول عليها بالتعاون المشترك مع المصانع المناسبة فقط. وسيكون من الأفضل إذا أمكن إجراء القياسات مباشرة داخل عملية الإنتاج. إلاّ أن هذا يتطلب، في معظم الأحوال، تنصيب أجهزة قياس في الموقع المحدد. وبالنسبة إلى بعض المواد والمنتجات، فهناك القليل من البيانات المتوافرة أو ربما قد لا تتوافر هذه البيانات. وغالباً ما يتم تعديل عمليات الإنتاج، على سبيل المثال، بعد زيادة تكاليف الطاقة في العامين 1973 و1978. وفي أغلب الأحيان، إذا كانت البيانات لا تستند إلى دراسات حديثة، فإن البيانات القديمة تُظهِر شدة طاقة مرتفعة جداً، ما تعني أن إنفاق الطاقة المحدد لإنتاج طن واحد من مادة معينة يُفترض أن يكون عالياً جداً.

تتضمن عملية الإنتاج حاملات طاقة مختلفة: حرارة العملية (مثلاً، المتولدة بواسطة الفحم الحجري أو وقود النفط)، أو الكهرباء، أو الغازولين من أجل تشغيل المحركات. ويجب إعادة حساب سلاسل الطاقة هذه وتهيئتها وفقاً لمقياس مرجعي. وغالباً جداً ما يُستخدَم إنفاق الطاقة الأساسية. وبالتالي، للبلدان التي تساهم بشكل كبير في توليد الطاقة من الطاقة المتجددة، فإن استهلاك الطاقة الأولية المكافئة هو نظري تماماً وليس بذي صلة. وتُظهر الطريقة التي يتم بها تحديد سلاسل الطاقة هذه الفلسفة المتأصلة لصانعيها ووسائل استخدام طاقتهم، مثلاً، لتلك الاقتصاديات المستندة إلى الوقود

الإحفوري، التي تقضي أنه يجب حساب عملية الإنتاج بوحدات قياس الطن الفحمي (أو الطن النفطي)، حتى ولو لم يتم استخدام حامل الطاقة هذا إطلاقاً في سلسلة العملية. ومثلاً أيضاً، أكبر الدول المنتجة للألمنيوم مثل النرويج وأيسلندا لا تستخدم إطلاقاً الوقود الإحفوري لتوليد الطاقة، وبالتالي فإن التحويل إلى الوحدات الفحمية هو فقد في الدقة فقط، بينما عامل التحويل القابل للتطبيق ليس ثابتاً ويعتمد على التقنية المطبقة نظرياً. وبما أن مخزون الوقود الإحفوري محدود وتطبيقه كوحدة قياس مرجعية يصبح تخميني بمرور الزمن، ومن جهة أخرى يزداد استخدام الطاقات المتجددة في العديد من أنحاء العالم، فإنه من المعقول التحول إلى وحدة قياس مرجعية أكثر استدامة.

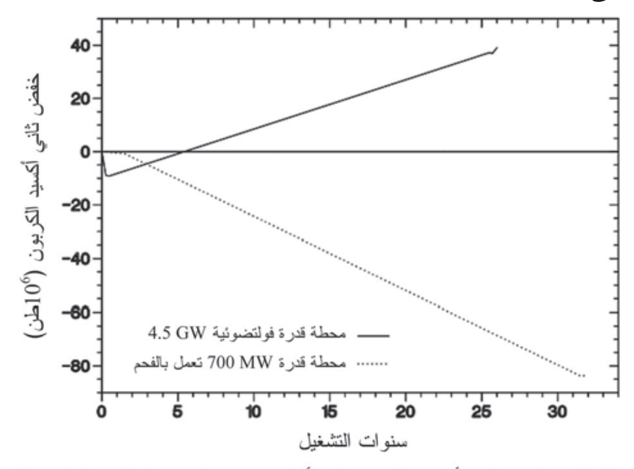
يعتبر تحليل سلسلة الطاقة وسيلة لإيجاد توازنات الانبعاث. والخطوة الأولى لذلك هو تحديد انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، التي لها صلة بإنفاق الطاقة المتراكِمة للمُنتَج. منهجياً، من السهل إجراء هذا إذا توافرت قائمة مفصلة بمخزون حاملات الطاقة. يمكن تكوين صافي توازنات الانبعاث أيضاً بالطريقة نفسها كما لاستخدام الطاقة.

9-5 تأثيرات خفض ثاني أكسيد الكربون باستخدام الفولتضوئية

لدراسة هذه التأثيرات، يتم إجراء تحليل لسلسلة العملية لدورة كاملة للإنتاج، والاستخدام، وإعادة التدوير. وفي أثناء إجراء ذلك، سيتم الأخذ في الحسابات النتائج الناتجة من الدراسات أعلاه:

- إنفاق الطاقة للإنتاج.
- النقل والتنصيب.
- مردود المولدات الفولتضوئية خلال عمرها الزمني.
- إعادة التدوير.

نتيجة الافتقار إلى الخبرة الصناعية في إعادة تدوير المنظومات الفولتضوئية، تم افتراض معدل إعادة تدوير 25 في المئة. تمثّل هذه القيمة الحد الأدنى، إلاّ أن دراسات أخرى مثل (Bruton [et al.] 1994) تذكر بأن قيماً إلى حد 70 في المئة هي محتملة. ويُبيِّن الشكل (9-3) الاختلاف الأساسي من حيث انبعاث ثاني أكسيد الكربون وانخفاض ثاني أكسيد الكربون بين محطات القدرة التقليدية ومحطات القدرة الفولتضوئية. وبالرغم من أن محطات القدرة الفولتضوئية في بداية دورة حياتها تُظهِر بعض الإسهامات السالبة لخفض ثاني أكسيد الكربون، إلاّ أنها لاحقاً تقوم بخفض ثاني أكسيد الكربون بشكل جيد جداً. وإسهام محطات القدرة التقليدية المستندة إلى الوقود سالبة دائماً على مدى دورة حياتها كاملة.



الشكل (9-3): خفض ثاني أكسيد الكربون في أثناء دورة حياة محطة قدرة فولتضوئية 4.5 GW_p يتم تشغيلها في ألمانيا مقارنة بمحطة قدرة 700 MW تعمل بالفحم الحجري وبالمردود نفسه الكهربائي (3.5 TW·h/a).

9-5-1 توازن الانبعاث المحدد

يبيّن الجدول (9-2) إنفاق الطاقة المتراكِمة (مقسَّم إلى كهرباء، ووقود، واستهلاك غير طاقي) وانبعاث ثاني أكسيد الكربون لمحطة

طاقة فولتضوئية في ألمانيا. توازن ثاني أكسيد الكربون في هذا الجدول استند إلى أقسام إنفاقات الطاقة. بالنسبة إلى الكهرباء تم تطبيق الاستهلاك الفعلي لمحطة الطاقة.

الجدول (9-2): إنفاق الطاقة وانبعاث ثاني أكسيد الكربون لإنتاج محطات القدرة الفولتضوئية.

نوع الخلية	الكهرباء			الوقود		الاستهلاك غير الطاقي[1]	
	الطاقة (kWh/kW$_p$)	CO_2 في ألمانيا (kg/kW$_p$)	CO_2 في بريطانيا (kg/kW$_p$)	الطاقة (kWh/kW$_p$)	CO_2 (kg/kW$_p$)	الطاقة (kWh/kW$_p$)	CO_2 (kg/kW$_p$)
أحادية البلورة	5144	2726	360	1152	346	228	52.4
متعددة البلورة	2530	1341	177	1630	489	450	1035

(1) الاستهلاك غير الطاقي: استخدام حاملات الطاقة كمادة بناء. الخصائص المميزة: كهرباء: 53.0 kg CO_2/kWh، وقود: 3.0 kg CO_2/kWh، استهلاك غير طاقي: 23.0 kg CO_2/kWh. البيانات المُدخَلة مأخوذة من (Hagedorn, 1989) و(Wagner, 1996)، و(Höner, 1997).

9-5-2 تأثير الفولتضوئية في خفض انبعاثات CO_2 في ألمانيا

بالرغم من أن الحسابات المعطاة أعلاه تشير إلى الانخفاض المحتمل لثاني أكسيد الكربون بواسطة الفولتضوئية، إلاّ أن الحسابات أدناه تعطي تقييماً للتأثير الإجمالي للانخفاض المحتمل لثاني أكسيد الكربون من الفولتضوئية المطبقة في ألمانيا.

يكون تأثير خفض الانبعاثات أعلى ليس فقط، حتى وإن لم تؤخذ المكونات الفعلية للشبكة الكهربائية في الحسابات، التي تبعث في المتوسط 0.53 kg/kWh، بل أيضاً أولوية سياسات وخطط الطاقة؛ مثلاً، استهلاك الطاقة في ألمانيا راكد عند أعلى مستوى، وسيتم استخدام سعة إضافية لتوليد القدرة لاستبدال محطة القدرة الموجودة. الإرادة السياسية لكل الأطراف ذات العلاقة في ألمانيا هي

خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، ولتحقيق ذلك الهدف بطريقة فاعلة يتم استبدال محطات الطاقة التي لها انبعاثات عالية محددة أولاً مثل محطات الطاقة العاملة بالفحم الحجري وفحم الليغنيت، وتجدر الإشارة أيضاً إلى أن هذه الأنواع من محطات الطاقة تتلقى قدراً كبيراً من الإعانات المالية التي يمكن توفيرها (انظر الجدول (أ ـ 7) في الملحق). وإذا تم استعمال كميات كبيرة من الفولتضوئية أو طاقات متجددة أخرى، وكانت الانبعاثات المحددة لشبكة الكهرباء العمومية تقل من حيث ثاني أكسيد الكربون الناتج، فإنه يمكن تحقيق انبعاثات أقل في أثناء إنتاج الأنظمة الفولتضوئية («مبدأ الولود»).

أول دراسة حول إمكانيات الفولتضوئية السقفية في ألمانيا أُجريت من قِبَل كالتشميت (Kaltschmitt, 1993). كانت قاعدة البيانات المطبقة التعداد السكاني لألمانيا لعام 1987 وتم تقديرها استقرائياً إلى عام 1991 وفقاً لإحصائية زيادة المباني.

وقد تم الحصول على تمييز جيد بين السقوف المائلة، والسقوف المستوية في المباني السكنية، والمباني التجارية، والسقوف المظللة المستخدمة أيضاً في أروقة المصانع نتيجة الإضاءة الجيدة. وهذه الأخيرة تتيح أقصى استعمال من مساحة السقف، بالرغم من أن الأجهزة التي سيتم تركيبها يمكن إلحاقها مباشرة في أعلى واجهة المبنى.

تعتبر العوامل المحدِّدة لتنصيب المنظومات الفولتضوئية على السقوف كالآتي:

- الزاوية الرأسية القابلة للاستعمال هي 90^{o}، وهذا يعني أن الانحراف المسموح به من الجنوب هو $45^{o}+$.
- نتيجة القيود الإنشائية مثل الأبواب المؤدية إلى السقف، وأعمدة التهوية، وفتحات المداخن، فإن 20 في المئة من مساحة السقف

غير قابلة للاستخدام؛ وفي مباني المصانع تم تقدير خفض إضافي 15 في المئة في المساحة.

- القيود الأخرى مثل الظل (10 في المئة) وحماية المباني التاريخية والنصب التذكارية (5 في المئة تماماً مثل السقوف المائلة) تقلل من إمكانية النظام الفولتضوئي أيضاً.
- للسقوف المستوية، أقصى مساحة تغطيها المنظومة هي 33 في المئة.

وإجمالاً، تعتبر 16 في المئة من المساحة الإجمالية للسقوف المائلة و25 في المئة للسقوف المستوية ملائمة لتطبيق أنظمة الطاقة الشمسية. وهذا يوافق مساحة منظومة قدرها $800\ km^2$ لألمانيا.

الجدول (9-3): انخفاض ثاني أكسيد الكربون بواسطة محطات القدرة الفولتضوئية في ألمانيا.

	الإنتاج	النقل	التنصيب والتفكيك	إعادة التدوير (25 في المئة)	المردود السنوي		التوازن الإجمالي
نوع الخلية (العمر الزمني)	CO_2 (kg/kW_p)	CO_2 (kg/kW_p)	CO_2 (kg/kW_p)	CO_2 (kg/kW_p)	الطاقة (kWh/kW_p)	CO_2 (kg/kW_p)	CO_2 (kg/kW_p)
أحادية البلورة (25 سنة)	3124.0	52.9	15.0	−781	770	−408	−7791.3
متعددة البلورة (25 سنة)	1933.0	58.2	16.5	−483	770	−408	−8677.3
متعددة البلورة (20 سنة)	1933.0	58.2	16.5	−483	770	−408	−6637.3

الخصائص المميزة: الكهرباء: $0.53\ kg\ CO_2/kWh$، والوقود: $0.3\ kg\ CO_2/kWh$، والاستهلاك غير الطاقي: $kg\ CO_2/kWh$ ؟. النقل الداخلي للنظام الفولتضوئي: بشاحنة مسافة 350 km : $4.40\ kg\ CO_2/kW_p$، وبحافلة تسليم مسافة 50 km : $12.5\ kg\ CO_2/kW_p$. وزن النظام الفولتضوئي: سليكون أحادي البلورة: 330 kg/kW_p، سليكون متعدد البلورة: 363 kg/kW_p، وكفاءة النظام الفولتضوئي (STC): 10 في المئة. معدل الأداء في أثناء التشغيل: 70 في المئة (انعكاس، وتأثير درجة الحرارة، وطيف، و 5 $f(G) =$ ، و 5$_{DC/AC}$). الإشعاعية: kWh/a1.100. البيانات المُدخَلة مأخوذة من Hagedorn, 1989، وWagner, 1996، وHöner, 1997.

إن إسهام كل من المباني السكنية والمباني غير السكنية متساوي تقريباً. وفي هذه المساحة ($800\ km^2$)، يمكن توليد TWh 75,3 من الكهرباء الفولتضوئية، مما يعني خفض 40 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون تحت الظروف الحقيقية، والذي يوافق 5.6 في المئة من الانبعاث الكلي لثاني أكسيد الكربون. وبالأخذ في الاعتبار الانبعاثات من أجل إنتاج الفولتضوئية تحت الظروف الحقيقية، فإن هذه القيمة تنخفض بمقدار 20 في المئة. وإذا أُخذت المواقع المفتوحة القابلة للاستخدام في الحسابات أيضاً، فإنه يمكن استنتاج مساحة منظومة$2000\ km^2$ على الأقل، حتى ولو أُخِذت فقط المساحة الزراعية الزائدة في الاعتبار (Staiβ 1996). وهذا يؤدي إلى مردود كهربائي سنوي TWh 211، آخذين في الاعتبار الكفاءة الأعلى لمحطات القدرة الأكبر في المواقع المفتوحة. هذا يوافق 46 في المئة من صافي استهلاك الكهرباء البالغ TWh 460. وشبكة الإمداد الكهربائي والأحمال يجب تهيئتها من حيث التخزين الإضافي وتبادل الطاقة. وبالأخذ في الاعتبار فقط سعات الخزن الموجودة، فإن الإسهام المحتمل للفولتضوئية سينخفض إلى 8.7 في المئة، موافقاً لمساحة منظومة قدرها $400\ km^2$. ويتطلب حساب صافي الاستقرار مشاركة دائمة قدرها 25 في المئة لمحطات القدرة التقليدية، ومشاركة محطات القدرة الفولتضوئية هي 6.5 في المئة فقط. وإذا كان هناك تخزين ملائم يسمح بخزن 2 في المئة من الطاقة الكلِّية، فإن إسهام الفولتضوئية يمكن أن يكون 20 في المئة (انظر (Beyer [et al.], 1990، و(Staisβ, 1995)، موافقاً لانخفاض ثاني أكسيد الكربون بمقدار 47.7 مليون طن، أي 6.7 في المئة من ثاني أكسيد الكربون المنبعث من ألمانيا. تعتبر الافتراضات التي تم إجراؤها من أجل الحسابات معتدلة ومقيدة، مثلاً، المواقع التي لها أقصى فقد قدره 10 في المئة، مقارنة بالاتجاه الأمثل للمنظومة، هي التي تم أخذها في

الاعتبار. واستعمال واجهات المباني والمواقع المفتوحة في العقارات السكنية وفي البنية المرورية ومنها وسائل المشاة لم يتم أخذها في الاعتبار أيضاً.

9-5-3 اختلاف الموقع

بالرغم من أن متطلبات الطاقة الكهربائية المحددة لا تتفاوت بشكل ملحوظ لمعظم المصانع الحديثة لأجزاء الفولتضوئية في جميع أنحاء العالم، إلاّ أن الانبعاثات المعينة لثاني أكسيد الكربون تعتمد كثيراً على محطات القدرة (النووية، المائية، الإحفورية... إلخ) المنتِجة للكهرباء لتشغيل منشآت إنتاج أنظمة وأجزاء الفولتضوئية. وشدة ثاني أكسيد الكربون لمحطات القدرة الكهربائية ولشبكات الكهرباء الوطنية قد تتفاوت بشكل كبير (بين 17 g و1140 g من ثاني أكسيد الكربون لكل kWh_{el}) كما هو مبيّن في الجدول (9-4).

ملاحظات:

نتيجة الزيادة الكبيرة لإسهامات الرياح والطاقة الشمسية في بعض البلدان (مثل ألمانيا وإسبانيا) خلال السنوات الماضية، فإن مشاركة «الطاقات المتجددة الأخرى» في الجدول (9-4) قد تغيرت (مثلاً، في ألمانيا من 1.9 في المئة إلى 6.7 في المئة في عام 2005؛ وإسبانيا قامت بزيادة سعتها في تنصيب قدرة الرياح من 75 MW في عام 1994 إلى 8263 MW في عام 2004). المزيد من البيانات المحددة عن ألمانيا موضحة في الملحق في الجدول (أ ـ 7).

الجدول (9-4): مكونات محطات القدرة لتوليد الكهرباء في دول مختلفة (البيانات مأخوذة من (Schaefer, 1993)، و(Mauch, 1995)، و(Tahara [et al.] 1997)، والجمعية الألمانية للكهرباء - 1999/1998 (VDEW) منشورة في عام 2002*)، وانظر أيضاً الجدول (أ-7) في الملحق.

الدولة	وقود أحفوري (٪)	قدرة نووية (٪)	قدرة مائية (٪)	طاقات متجددة أخرى (٪)	شدة ثاني أكسيد الكربون من الكهرباء (g/kWh)
اليونان*	89.3	0	10.5	0	1111
ألمانيا*	62.4	31.2	4.5	1.9	517
هولندا*	94.5	4.3	0.1	1.1	442
اليابان	61.1	28.2	10.5		439
بريطانيا*	71.3	25.1	2.3	1.3	438
الاتحاد السوفيتي (سابقاً)	74.7	12.4	12.9		
إسبانيا*	55.7	28.3	13.8	2.2	393
فنزويلا	43.0	0	57		
البرازيل	6.0	0.8	93.2		70
فرنسا*	9.7	75.0	15.3	0	61
السويد*	4.4	46.6	47.0	2.0	34
النرويج*	0.7	0	99.3		16
غانا	0.2	0	99.8		
أيسلندا	0.1	0	99.9		15
مزيج من الدول المصدرة للألمنيوم					139
مزيج من الدول المصدرة للنحاس					572

على سبيل المثال، إذا تم إنتاج نظام فولتضوئي في البرازيل بدلاً من ألمانيا، عندئذ فإن انبعاث ثاني أكسيد الكربون المحدد سينخفض من 0.517 kg/kWh إلى 0.07 kg/kWh لاستهلاك الكهرباء. وبالتالي، فإن انبعاث ثاني أكسيد الكربون لإنتاج نظام فولتضوئي سيكون أقل أيضاً؛ ومن جهة أخرى، فإن تأثير خفض ثاني أكسيد الكربون في أثناء مرحلة التشغيل سيكون أقل أيضاً (آخذين في

(*) مستقاة من الجمعية الالمانية للكهرباء VDEW لعامي 1998/ 1999.

الاعتبار التوصيل الشبكي للفولتضوئية والوضع الفعلي للشبكة المحلية، انظر الجدول (9–5)(2). وبشكل مثالي، يتم إنتاج الأنظمة الفولتضوئية أينما تكون انبعاثات ثاني أكسيد الكربون أقل ما يمكن، ويتم تنصيبها وتشغيلها حيثما تكون قادرة على تفادي الانبعاثات القصوى لثاني أكسيد الكربون (انظر الجدول (9–6)). وتأثير النقل، إذا تم عن طريق الشحن البحري، منخفض جداً.

الجدول (9–5): مثال على توازن ثاني أكسيد الكربون للأنظمة الفولتضوئية المتصلة بالشبكة في البرازيل.

	الإنتاج	النقل	التنصيب والتفكيك	إعادة التدوير (25 في المئة)	المردود السنوي		التوازن الإجمالي
نوع الخلية (العمر الزمني)	CO_2 (kg/kW_p)	CO_2 (kg/kW_p)	CO_2 (kg/kW_p)	CO_2 (kg/kW_p)	الطاقة (kWh/kW_p)	CO_2 (kg/kW_p)	CO_2 (kg/kW_p)
أحادية البلورة (25 سنة)	758.0	158.7	30	-189.50	1225	-85.8	-1386.6
متعددة البلورة (25 سنة)	769.5	174.6	33	-189.50	1225	-85.8	-1359.1
متعددة البلورة (20 سنة)	769.5	174.6	33	-192.40	1225	-85.8	-930.1

الخصائص المميزة: كهرباء: 0.07 kg CO_2/kWh وقود: 3.0 kg CO_2/kWh، استهلاك غير طاقي: 0.23 kg CO_2/kWh. النقل الداخلي للنظام الفولتضوئي: بشاحنة مسافة 1050 km: 121.2 kg CO_2/kW_p، وبحافلة تسليم مسافة 150 km: 37.5 kg CO_2/kW_p. وزن النظام الفولتضوئي: سليكون أحادي البلورة: 330 kg/kW_p، سليكون متعدد البلورة: 363 kg/kW_p، كفاءة النظام الفولتضوئي (STC): 10 في المئة. معدل الأداء في أثناء التشغيل: 68 في المئة (انعكاس بصري، وتأثير درجة الحرارة، وطيف، و5 = f(G)، و5 DC/AC). الإشعاعية: 800,1 kWh/a. البيانات المُدخَلة مأخوذة من Hagedorn, 1989، وWagner, 1996، وHöner, 1997.

(2) بسبب تزايد استهلاك القدرة الكهربائية ستحتاج البرازيل إلى مزيد من مصانع القدرة: وفيما لا يتوفر مواقع مناسبة لتنصيب مصانع قدرة كهرومائية كبيرة برزت سيناريوهات بديلة ستغير توازن الطاقة مع تراكيز CO_2 المتولدة في البرازيل.

وحيث إن العديد من المكونات، والمنتجات شبه المكتملة، والمواد الخام يتم توريدها، فإن هذا يجعل عملية الفحص أكثر صعوبة؛ وبالإضافة إلى مكونات حدائق محطة توليد الكهرباء في موقع الإنتاج (وانبعاثاتها المحددة)، يجب الأخذ في الاعتبار أيضاً الوضع في الدول التي تم منها توريد البضاعة. مثلاً في ألمانيا، 50 في المئة من الألمنيوم الأساسي (الخام) يتم استيراده، وبالتالي فإن مكونات حديقة محطة الطاقة في الدول التي تم منها استيراد المادة يجب أيضاً أخذها في الاعتبار.

الجدول (9-6): خفض CO_2 بواسطة الأنظمة الفولتضوئية كدالة في الموقع، والإنتاج، والتشغيل.

موقع الإنتاج موقع التنصيب	ألمانيا (برلين) kg/kW_p	البرازيل (ريو دي جانيرو) kg/kW_p
ألمانيا، ربط شبكي (برلين، 52º30' N، 13º22' E)	7792 (sc-Si, 25a)	10124 (sc-Si, 25a)
	8677 (mc-Si, 25a)	9805 (mc-Si, 25a)
	6637 (mc-Si, 20a)	7765 (mc-Si, 20a)
البرازيل، ربط شبكي (ريو دي جانييرو، 22º53' S، 43º12' W)	-1009 (sc-Si, 25a)	1387 (sc-Si, 25a)
	162 (mc-Si, 25a)	1359 (mc-Si, 25a)
	-267 (mc-Si, 20a)	930 (mc-Si, 20a)
البرازيل، ربط غير شبكي (استبدال مولد ديزل بمحطة قدرة فولتضوئية)	24408 (sc-Si, 25a)	26805 (sc-Si, 25a)
	25372 (mc-Si, 25a)	26570 (mc-Si, 25a)
	19860 (mc-Si, 20a)	21058 (mc-Si, 20a)

البيانات المرجعية: الكهرباء في ألمانيا (ربط شبكي): $0.53\ kg\ CO_2/kWh$، والكهرباء في البرازيل (ربط شبكي): $0.07\ kg\ CO_2/kWh$. الكهرباء في البرازيل (ربط غير شبكي بواسطة مولد ديزل): $0.9\ kg\ CO_2/kWh$. الوقود: $0.3\ kg\ CO_2/kWh$، والاستهلاك غير الطاقي: $0.23\ kg\ CO_2/kWh$. وزن النظام الفولتضوئي: سليكون أحادي البلورة (sc-Si): $330\ kg/kW_p$، سليكون متعدد البلورة (mc-Si): $363\ kg/kW_p$، وكفاءة النظام الفولتضوئي (STC): 10% . النقل الداخلي للنظام الفولتضوئي في ألمانيا: شاحنة مسافة 350 km: $40.4\ kg\ CO_2/kW_p$، حافلة تسليم مسافة 50 km: $12.5\ kg\ CO_2/kW_p$ (للسليكون أحادي البلورة)، 58.2 $kg\ CO_2/kW_p$(للسليكون متعدد البلورة). النقل الداخلي للنظام الفولتضوئي في البرازيل

للسليكون أحادي البلورة: بشاحنة مسافة 1050 km : $121.2 kg CO_2/kW_p$، وبحافلة تسليم مسافة 150 km : $37.5 kg CO_2/kW_p$، وللسليكون متعدد البلورة: $174.6 kg CO_2/kW_p$ (وللربط غير الشبكي: ضعف النقل والتنصيب). النقل من ألمانيا إلى البرازيل: 10000 km بسفينة شحن: Si: $31 kg CO_2/kW_p$ (للسليكون أحادي البلورة)، Si: $34.1 kg CO_2/kW_p$ (للسليكون متعدد البلورة). معدل الأداء في أثناء التشغيل: 70 في المئة في ألمانيا، و68 في المئة في البرازيل (انعكاس، ودرجة حرارة، وطيف، و $\eta = f(G)$، و$\eta_{DC/AC}$). الإشعاعية: 1100 kWh/a في ألمانيا، و 1800 kWh/a ϕ في البرازيل. الحصة النسبية لإعادة التدوير: 25 في المئة. بيانات إنفاقات الطاقة الأخرى مأخوذة من Hagedorn, 1989، و1996 ,Wagner، و1997 ,Höner.

بالرغم من أن معظم الدول المصدرة للألمنيوم تمتلك مستوى عالياً من مشاركة الطاقة المائية، إلاّ أن «استهلاك الطاقة الأساسية» المكافئ للألمنيوم المستخدَم والمعالج فعلياً هو فقط 169 MJ/kg. في المراجع العلمية، غالباً ما يتم الأخذ في الاعتبار استهلاك محطة القدرة الوطنية فقط، ما يؤدي إلى تقدير زائد «لاستهلاك الطاقة الأساسية» قدره 227 MJ/kg. يبيّن الجدول (أ-18) في الملحق ملخصاً لمكونات حديقة محطة القدرة وشدة ثاني أكسيد الكربون للدول الرئيسة المصدرة لخام الألمنيوم والنحاس. للتشغيل في ألمانيا (الإشعاعية السنوية في برلين على مستوى مائل أمثل هي 1,050 kWh/a) فإن مردود الطاقة الكهربائية لنظام فولتضوئي $1 kW_p$ هو $770 kWh_{el}/a$؛ وللتشغيل في ريو دي جانيرو (الإشعاعية السنوية هي 1,750 kWh/a) فإن القدرة الكهربائية المُخرجة للنظام الفولتضوئي نفسه $1 kW_p$ هي حوالى $1138 kWh_{el}/a$. وهذا الأمر نفسه يحدث لأماكن الإنتاج المختلفة في مواقع التطبيق: استبدال مولد ديزل صغير (0.9 إلى $10.5 CO_2/kWh_{el}$) بنظام فولتضوئي يمكن أن يمنع 0.85 إلى $1 CO_2/kWh_{el}$، بينما نظام فولتضوئي شبكي متصل بشبكة كهربائية «نظيفة» (مثلاً، البرازيل عند 0.07 CO_2/kWh_{el}) سوف لن يقلل كثيراً من ثاني أكسيد الكربون، وخصوصاً إذا تم إنتاج النظام الفولتضوئي باستخدام كهرباء من

شبكة «قذرة». وفي مثل هذه الحالة، فإن التأثير من حيث خفض ثاني أكسيد الكربون قد يكون سالباً أيضاً.

نتيجة متطلبات الحمل المختلفة، فإن مكونات أجهزة التوليد وانبعاثاتها المحددة لثاني أكسيد الكربون في الشبكة الكهربائية قد تتفاوت خلال اليوم. أوقات الذروة للأحمال (مثلاً، في البرازيل خلال أيام الأسبوع بين الساعة الخامسة مساءً والساعة العاشرة مساءً تبلغ عوامل الحِمل 40 في المئة) يتم خدمتها في أغلب الأحيان بواسطة محطات قدرة تعمل بوقود إحفوري، ما تزيد من متوسط انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (وأيضاً قيمها للاستبدال) خلال هذه الأوقات. ولسوء الحظ، قدرة الخرج للفولتضوئية لا تتوافق مع هذه الذروة للأحمال في نظام الربط الشبكي الداخلي في البرازيل إجمالاً. وعلى المستوى المحلي، على أيّ حال، فإن بعض الشبكات تُظهِر توافقاً جيداً بين الطلب على القدرة والتوليد الفولتضوئي (مدينة فلوريانوبوليس (Florianópolis) وشركة كهرباء CELESC). والفولتضوئية يمكن أن تكون لها قيمة أكبر للمَرفق الخدمي من حيث الدعم الشبكي في مثل هذه الأحوال. في السنوات الأخيرة، إن القيود على إمداد القدرة الكهربائية في البرازيل لا تعطَى غالباً بقدرة الخرج القصوى المصنَّفة للمولدات المائية، ولكن بمقدار الماء المخزون في السد فقط، وبالتالي كانت المولدات المائية تعمل بقدرة مخفَّضة يمكنها بالكاد أن تتكيف مع ذروة الطلب. ويمكن للفولتضوئية أيضاً أن تساهم هنا بإزاحة أو بموازنة مستويات الماء في السدود من أجل الاستخدام خلال ذروة الطلب. علاوة على ذلك، يمكن اعتبار التوليد الفولتضوئي والمائي مكمّلان لبعضهما في أثناء البدء الموسمي عندما تبلغ مستويات مياه السد قيم منخفضة حرجة تتزامن مع مستويات عالية للإشعاع الشمسي في الصيف في الشمال

الشرقي من البرازيل. وفي ألمانيا، الذروة اليومية للأحمال تحدث مبكراً ويمكن مواجهتها جزئياً بواسطة الفولتضوئية. محطات القدرة الإضافية العاملة في ذروة الأحمال هي المخزون المائي، والغاز الطبيعي، والنفط، والوقود الممزوج. ونتيجة للتجارة الفاعلة للكهرباء بين الشركات والدول، وخصوصاً في أثناء ساعات الذروة للأحمال، والصعوبات في معرفة نوع الطاقة المستخدمة لملء سدود التخزين، فإن إجراء حساب دقيق لتوازن ثاني أكسيد الكربون لظروف الذروة واسع جداً ولن يتم تقديمه هنا.

الفصل العاشر

التحسين

الهدف هو تحقيق الحد الأعلى للمردود السنوي للطاقة الكهربائية. وهذه المهمة يتم تنفيذها عن طريق دراسة تأثير البيئة الفعلية من حيث الإشعاعية، والانعكاسات البصرية، ودرجة حرارة الوسط المحيط، والرياح، وأداء المكونات المختلفة وتفاعلاتها أيضاً.

تحسين الإشعاعية الواصلة إلى الخلية

بالأخذ في الاعتبار الإشعاعية المباشرة والانتشارية (والأخذ في الاعتبار أيضاً زوايا السقوط، والطيف الشمسي، والاستقطاب) والبياض.

المحول الشمسي الكهربائي/ الخلية الشمسية

التقنية، وإمكانية التطبيق، والوفرة، والربحية، والسلامة البيئية. وتأثيرات بيئة التشغيل (الطيف، وزوايا السقوط، ودرجة الحرارة، والتظليل، والبياض، والتوصيلات الكهربائية، وتوصيل الأسلاك) على القدرة المُخرَجة.

المنظومات الشمسية، والمولِّد الفولتضوئي

تنفيذ المولِّد الفولتضوئي في بيئة (مثلاً، ريفية) مع الأخذ في الاعتبار الأفكار الجديدة للتنصيب ومن أجل زيادة المردود عن طريق التحكم بالعوامل البصرية، والحرارية، والكهربائية، بما في ذلك السطح البيني للمنظومة الفولتضوئية والبيئة (مثلاً، انتقال الحرارة، والنفاذية البصرية). وأفكار الدمج الهندسي أيضاً بأقل التكاليف عن

طريق استبدال عناصر الواجهة أو السقف (مثلاً، أرضية السقف بمجمع شمسي مدمج، (انظر (Wenham [et al.] 1997))؛ والتوليد المشترك، انظر مجلة **البرازيلية** (*Brazilian*)).



الشكل (10-1): منظومات فولتضوئية ثابتة، ومولد فولتضوئي $6.6\ kW_p$ بجهاز تعقب ثنائي المحور ((Hans Grohe)، (Offenburg)).

التحويل DC إلى AC، وأجهزة التغذية الشبكية مقارنة الأفكار المختلفة (مثلاً العاكسات المتعاقبة، والعاكس ذو التوجه المتسلسل، والعاكس المدمج بالمنظومة) مع الأخذ في الاعتبار معدل التكلفة إلى الفائدة.

10-1 تحسين الإشعاعية على الخلية الشمسية

10-1-1 تحسين الإشعاعية عن طريق تعقُّب الشمس

يمكن تحسين الإشعاعية على المولد الشمسي عن طريق تعقُّب

مسار الشمس من شروق الشمس وحتى غروبها. في حالة مدينة برلين بألمانيا، يزداد المردود بمقدار 25–30 في المئة في الصيف و 0–10 في المئة في الشتاء. ومعظم أجهزة التعقب الأحادية المحور تقوم بتتبع مسار الشمس من الشرق إلى الغرب (تعقب سمتي) بميل ثابت. وأجهزة التعقب الثنائية المحور تقوم بتتبع التغير الموسمي أيضاً في ارتفاع مسار الشمس. يبيّن الشكل (10-1) مثالاً لمولد فولتضوئي بجهاز تعقب ثنائي المحور مقارنة بمولد فولتضوئي ثابت. تكاليف جهاز التعقب كبيرة. وفي العديد من الأحوال، لا يستطيع المردود الإضافي تعويض التكاليف الإضافية (Ertürk, 1997). وفي بعض أنحاء العالم الثالث (الهند، مثلاً) تم تحقيق كفاءة تكلفة عالية عن طريق التعقب اليدوي (مثلاً، كل 3 ساعات)، نتيجة للتكاليف المنخفضة للعمالة.

10–1–2 تحسين الإشعاعية على الخلية بخفض الانعكاسات البصرية

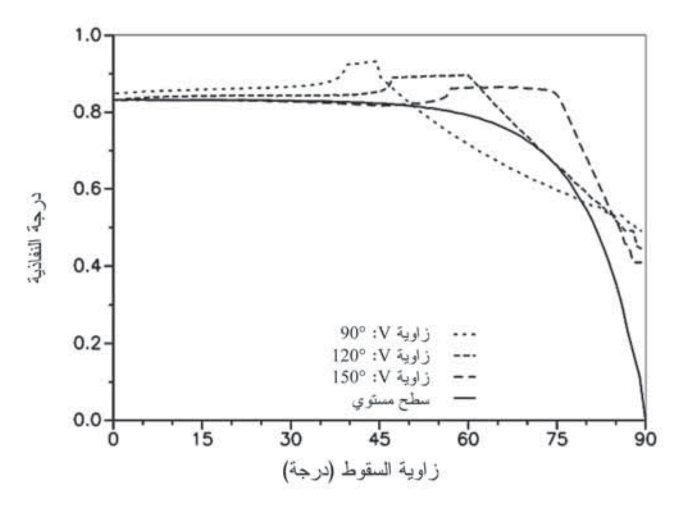
في التنصيب الفولتضوئي الثابت (غير المتعقِّب)، فإن زاوية السقوط للإشعاعية الشمسية نادراً ما تكون عمودية، وبالتالي يزداد الفقد بالانعكاس مقارنة بالحد الأدنى الممكن (في الأسطح المستوية). وفي الظروف غير الملائمة، على سبيل المثال النظام الفولتضوئي المدمج بالواجهة في مناطق خطوط العرض، فإن الفقد بالانعكاس للإشعاعية المباشرة قد يبلغ 42 في المئة (Krauter, 1993c).

الفقد بالانعكاس يمكن خفضه بتغيير خصائص السطح (بإنشاء بنية)، أو بإجراء توافق أفضل لمعاملات الانكسار للطبقات البصرية الموجودة أعلى الخلية الشمسية، أو بطليات (Coatings) إضافية مضادة للانعكاس.

10-1-2-1 الإنشاء البنيوي لسطح المنظومة الفولتضوئية

إنشاء بنية مناسبة للسطح البصري، الذي يمنع الإشعاعية المنعكسة من أن تُفقَد من الجانب البنيوي للسطح، تسمح للإشعاعية بالدخول ثانية (بأجزاء كبيرة) إلى المنظومة الفولتضوئية عندما ترتطم بالجانب المجاور المستهدف للبنية.

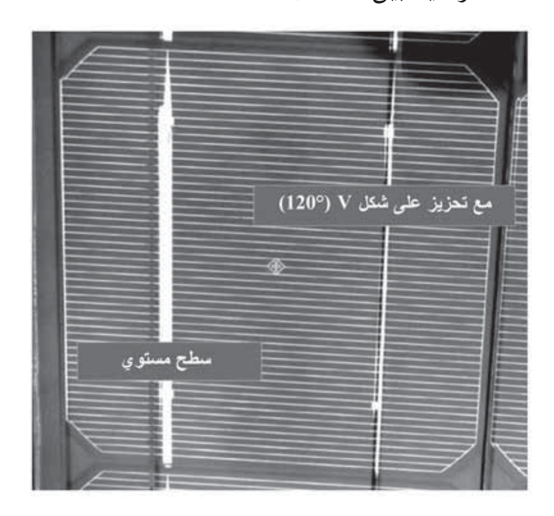
للحصول على دلالات عن كامل أداء المنظومة، تم استخدام برنامج محاكاة لثلاث طبقات من الألواح المستوية، وتعديله ليأخذ في الاعتبار أيضاً الأسطح ذات بنية على شكل V. النتائج التي حصلنا عليها لثلاث زوايا تحزيز (Grooving) مختلفة موضحة في الشكل (10-2)، الذي يبيّن الإشعاعية النسبية على الخلية كدالة في زاوية السقوط لزوايا تحزيز مختلفة هي 90º، و 120º، و150º. وعلى مدى كبير نسبياً لزوايا السقوط، يمكن ملاحظة زيادة مستوى الإشعاعية على الخلية الشمسية (مقارنة بالسطح المستوي).



الشكل (10-2): النفاذية البصرية للسطح ككل لمنظومة ذات بنية على شكل V (لم يطبّق إنشاء بنية انتقائية) لزوايا تحزيز مختلفة على شكل V مقارنة بسطح عادي (مستوي).

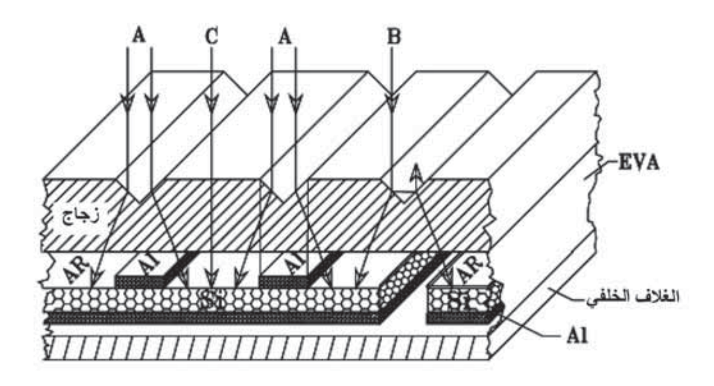
10-1-2-2 إنشاء بنية انتقائية

الميزة المهمة التي تم الحصول عليها بواسطة إنشاء بنية جزئية انتقائية للغطاء هو مقدرته على الحرف. على سبيل المثال، للتلامس الأمامي ذي العرض 1.5 mm («القضيب الموصل»)، فإن الإشعاعية على سطح مستوي يقع أعلى التلامس تعتبر عديمة الفائدة، لكن البنية المنشأة على شكل V تستطيع القيام بتوجيه الإشعاعية (بشكل كامل خلال زاوية سقوط مداها ±5º إلى العمودي على المستوى) على المساحات الفاعلة. وحيث إن إنشاء البنية للسطح الأمامي تم إجراؤه جزئياً، فإن قيمة النفاذية للمساحة كاملة تتشكل بالمعدل المرجَّح لمساحتي البنية المنشأة والمستوية. الكسب المتوقع هو حوالى 60 في المئة للتلامس الأمامي ومساحة القضيب الموصل (اعتماداً على شكل وانعكاسية التلامسات) و80 في المئة إلى 95 في المئة للمساحة الفراغية بين الخلايا.



الشكل (10-3): الأيسر: سطح منظومة عادي مستوي. الأيمن: انخفاض بصري لعرض شريط التلامس (القضيب الموصل) بتطبيق حز على شكل V على السطح الواقع أعلى التلامس.

بإنشاء بنية جزئية كما هو مبيّن في الشكل (4-10) فقط أعلى المساحات غير النشطة فولتضوئياً (على سبيل المثال، أعلى شبكات التلامس (الشعاع A) وفي فراغات الخلية (الشعاع B)، فإن الأشعة الساقطة يمكن توجيهها على المساحات النشطة.

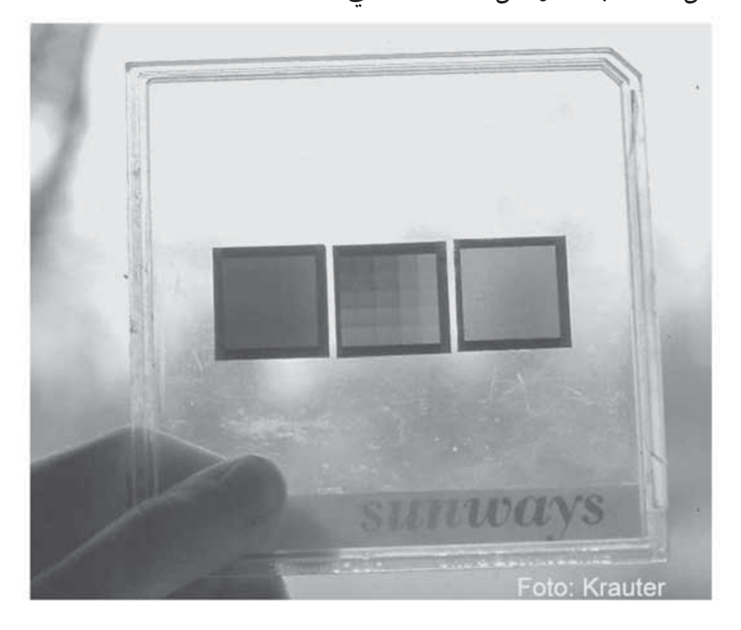


الشكل (4-10): إنشاء بنية جزئية لسطح المنظومة بواسطة حز على شكل V أعلى المساحة غير النشطة فولتضوئياً.

عند السطح البيني للهواء والزجاج، تزداد النفاذية البصرية من 95.7 في المئة عند السطح المستوي (انظر الشعاع C) إلى 99.7 قي المئة عند الحزّات ذات الشكل V (انظر الشعاعين A و B) نتيجة لحقيقة أن الانعكاسات لم يتم فقدها كاملة، إلاّ أن الأشعة المنعكسة من سطح السقوط إلى السطح المقابل للحز ذي الشكل V (أشعة غير مستقطبة، وسقوط عمودي، وزاوية تحزيز 90º، و$\eta_{glass} = 1.52$ على طول موجي $\lambda = 550nm$). وبما أن زوايا السقوط على الطبقات السفلى تصبح أكبر عندما ينكسر الشعاع بواسطة الحز، فإن الكسب للأشعة الواصلة إلى الخلية تنخفض.

بالنسبة إلى زاوية السقوط 80º، تزداد النفاذية على سطح السقوط من 60.9 في المئة (في السطح المستوي) إلى 95.4 في المئة، إلاّ أن السطح المقابل للحز يظل سلبياً (لأنه لا توجد أشعة تنعكس عليه)،

ولهذا ينخفض الكسب المرجّح (بالنسبة إلى مساحة الإسقاط). وفي حالة استنفاد التربة في البينة المنشأة، سوف لن يحدث تظليل للمساحات النشطة فولتضوئياً. يبيّن الشكل (10-3) بوضوح تأثير الانخفاض البصري لمساحات الخلية غير النشطة، مثل القضبان الموصلة، عن طريق إنشاء البنية. وبالنسبة إلى الإشعاعية الساقطة، فإن حوالى 30 في المئة فقط من مساحة التلامس النشطة ستكون «مرئية» لها، ما يخفض الفقد نتيجة تظليل القضيب الموصل بمقدار 70 في المئة.



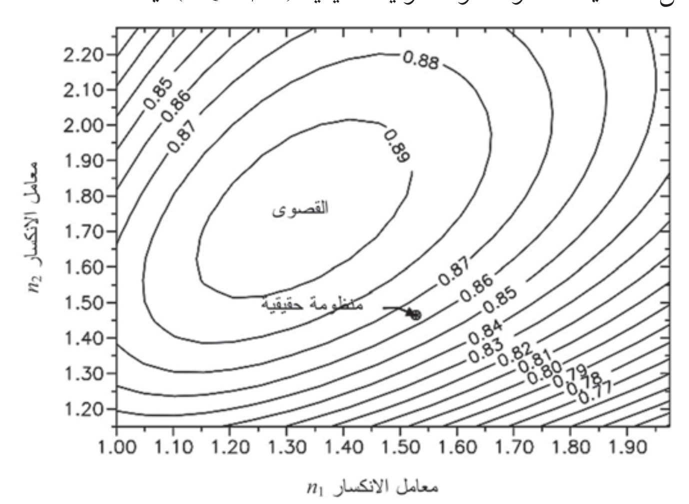
الشكل (10-5): شرائح سليكونية ذات بنية على شكل V على كِلا الوجهين.

بالإضافة إلى التحسينات بواسطة إنشاء بنية لأسطح المنظومة، يمكن تحسين خصائص الامتصاص داخل الخلية الشمسية بالإنشاء البنيوي أيضاً. وعلاوة على البنية الهرمية المعروفة (انظر Green, 1995)، يمكن تطبيق بنية الحز أيضاً على شكل V على كِلا الجانبين (اتجاه التحزيز رأسي على كلٍّ منهما) (انظر الشكل (10-5)). وإلى

جانب المادة المستخدمة للخلية الشمسية، يجب زيادة الكفاءة أيضاً.

10-1-2-3 التوافق المحسَّن لمعاملات الانكسار لطبقات تغليف المنظومة

باستخدام النموذج البصري المقدم أعلاه كمحاكاة للنظام البصري المكوّن من الزجاج، وأسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين (EVA)، والطلية الإضافية المضادة للانعكاس، والخلية الشمسية السليكونية، فإن تغير أيّ معامل يؤدي إلى النتائج الآتية: التوافق البصري الأفضل للطبقتين العلويتين (الزجاج واسيتات ـ فينيل ـ الإثيلين) يؤدي إلى زيادة النفاذية البصرية (وبالتالي المردود الكهربائي) بمقدار 3.2 في المئة للمواد المثالية، و 1.9 في المئة للمواد الحقيقية (انظر Krauter, 1993c). يبيّن الشكل (10-6) النفاذية لإشعاعية رأسية غير مستقطبة لمعاملات مختلفة n_1 (معامل انكسار الطبقة الأولى الأمامية) و n_2 (معامل انكسار الطبقة الثانية). ويبيّن الشكل النفاذية لمنظومة فولتضوئية حقيقية (PQ 40/50) أيضاً.



الشكل (10-6): النفاذية البصرية لتغليف منظومة كدالة في معامل الانكسار للوحين الغطائيين العلويين (شريحتين بصريتين) للسقوط العمودي للإشعاعية ($\theta = 0°$).

10-1-2-4 الطلية الإضافية المضادة للانعكاس

لتحقيق توافق أمثل لسطح المنظومة مع الهواء، يجب أن يكون للطلية الإضافية المضادة للانعكاس معامل انكسار n = 1.3. إلاّ أنه، لسوء الحظ، لا توجد مادة صلبة لها هذه الخاصية. ومع ذلك، فقد أُجريت تجارب باستخدام غشاء سائل كطبقة مضادة للانعكاس: استخدام الماء ($n = 1.33$) كطبقة مضادة للانعكاس أدى إلى زيادة تيار دائرة القِصَر بمقدار 2 في المئة (Krauter, 2004).

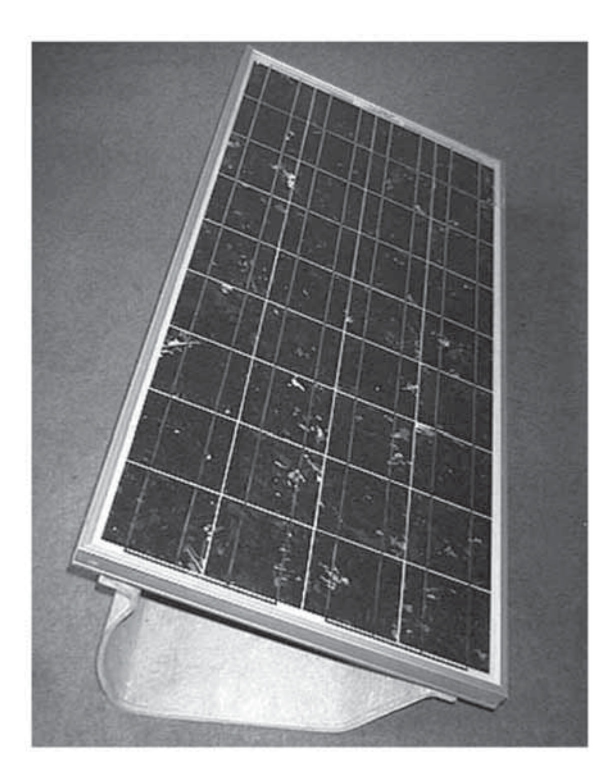
على أيّ حال، الطبقات الرقيقة بصرياً (مثلاً $\lambda/4$)، التي تعمل على خفض الفقد بالانعكاس حتى بالنسبة إلى معاملات الانكسار المنخفضة نسبياً، قد تم تطبيقها بنجاح في مجمعات حرارية شمسية وتُستخدَم بشكل شائع في الأجهزة البصرية العالية الجودة (مثلاً، عدسات الكاميرات، والمناظير... إلخ). وتجارب التطبيق الأولى للمنظومات الفولتضوئية (بما في ذلك تقييم المتانة، ومعدل التكلفة إلى الفائدة) هي في طريقها.

10-2 خفض نفقات التركيب

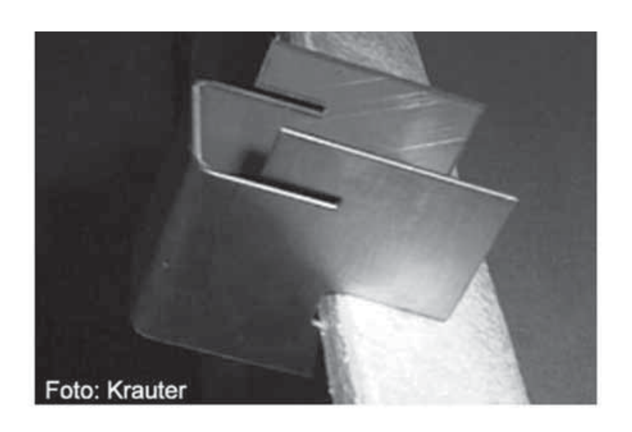
نظام التركيب الحديث الموضح أدناه (الشكل (10-7)) يسمح بتنصيب المنظومات الفولتضوئية من دون أدوات، ولكن باستخدام كُلاّبات فولاذية بسيطة مقاومة للصدأ فقط (انظر الشكل (10-8)). وإجهاد الثني لبنية الدعامة يعمل على تثبيت المكونات مع بعضها بعضاً وعلى ضمان التركيب المحكم للمنظومة الشمسية.

بنية الدعامة مصنوعة من الإيترنيت (Eternit) (انظر الشكل (10-7))، المناسب جداً للسقوف المستوية، حيث يمكن تثبيت النظام في السقف فقط بالتعبئة بحصى ومن دون تثقيب السقف. استبدال بنية الدعامة المعدنية التقليدية ببنية دعامة مصنوعة من الإيترنيت تؤدي إلى

خفض استهلاك الطاقة الأساسية بحوالى 90 في المئة. إلاّ أن المادة التي يتكون منها الإيترنيت تحتوي على الأسبستوس، ولهذا يجب إجراء التقطيع بحذر شديد، حيث إن الغبار الناتج من عملية النشر مادة مسرطنة. التطويرات الأخرى تستخدم مواد بلاستيكية معاد تدويرها (مثلاً، البوليبروبيلين (PP)، والبوليثيلين (PE) (ملاحظة: الإيترنيت هو الاسم التجاري لألياف الإسمنت، وهي مادة قوية تُستعمل غالباً للمباني والمنشآت).



الشكل (10-7): خفض تكاليف التثبيت باستخدام بنية دعامة ماركة Solbac.



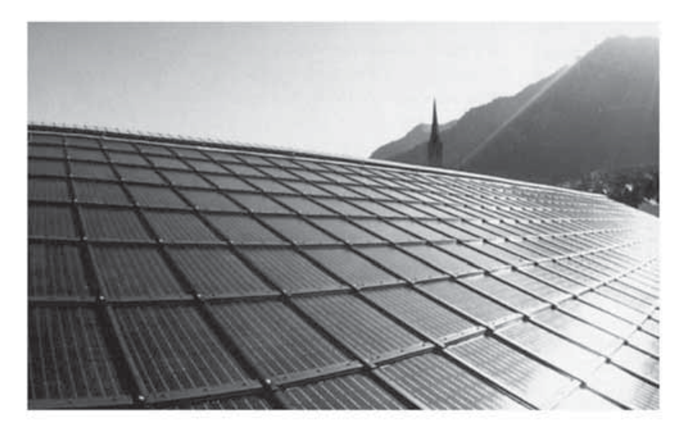
الشكل (10-8): كُلَّاب تثبيت مصنوع من فولاذ مقاوم للصدأ (V2A) ماركة Solbac للمنظومات الفولتضوئية الإطارية.

10–3 استبدال مكونات البناء

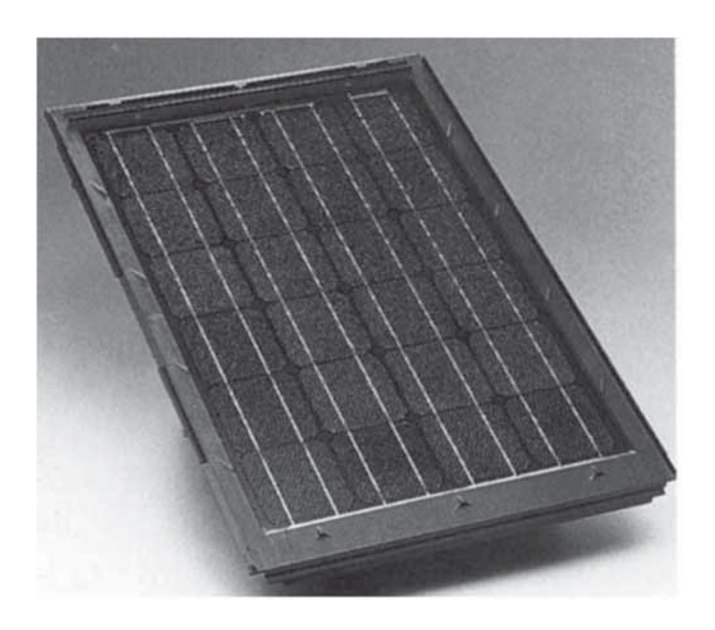
استبدال جزء عادي من المبنى ـ مثلاً أرضية، أو نافذة، أو واجهة السقف ـ بجزء مناسب للطاقة الشمسية يؤدي إلى توفير كبير في المادة والطاقة والتكاليف المالية، بينما الأجزاء التركيبية، مثل التشكيل الإطاري والألواح الزجاجية، لا يجب أخذها كجزء من المولد الشمسي في الموازنة.

10–3–1 بلاط السقف الشمسي

يبيّن الشكل (10–9) سقفاً مغطى ببلاط سقف شمسي مصنوع من زجاج الأكريليك الملوَّن. في كل بلاطة، تُدمج 24 خلية شمسية سليكونية أحادية البلورة، ويتم توصيل الأسلاك بين بلاط السقف الشمسي عن طريق مأخذ. وهذا النظام نفسه، ولكن بخلايا شمسية سليكونية أمورفية، تم تصنيعه من قِبَل شركة أتلانتيس (Atlantis) السويسرية. التكاليف هي حوالى $4.30\ €/m^2$، وبالتالي فإن سقفاً جديداً من هذا النوع سيكون تكلفته أقل بكثير من سقف تقليدي تم فيه تركيب مولِّد فولتضوئي.



الشكل (10-9): سقف مغطى ببلاط سقف شمسي مصنوع بواسطة شركة نيوتيك (Newtec السويسرية (ويلدانو (Wildanu)).



الشكل (10-10): بلاطة سقف شمسية واحدة من شركة وينتيك السويسرية.

10-3-2 الواجهات الشمسية

بالرغم من أن الواجهات الشمسية أقل قبولاً من وجهة النظر التقنية (مثلاً، إشعاعية أقل بمقدار 30 في المئة في ألمانيا)، إلاّ أنها جذابة جداً من حيث المظهر الخارجي. والشركات والمؤسسات التي تريد أن تعبر عن كفاءتها ووعيها البيئي (مثلاً، بائعو الطاقة، ومصانع مواد البناء، والبنوك، وشركات التأمين) غالباً ما تستعمل واجهات فولتضوئية للفت انتباه واهتمام العامة. إلى جانب الفقد بواسطة الإشعاعية المنخفضة يحدث فقد عالٍ بالانعكاس أيضاً. وفي المناطق القريبة من خط الاستواء، حيث يكون ارتفاع الشمس عالياً، فإن الفقد بالانعكاس قد يبلغ 42 في المئة من الإشعاعية الساقطة Krauter, 1994a. ومع ذلك، فإن تنصيب واجهة فولتضوئية قد ينتهي بتكلفة أقل من نظام سقفي زائداً واجهة تقليدية ثمينة ذات درجة عالية: الواجهات المصنوعة من الغرانيت، أو الرخام، أو الزجاج الخاص تكلف بين 750 إلى $2000\ €/m^2$ وسعرها على الأقل هو سعر الفولتضوئية نفسه. وفي هذه الحالة، يمكن استعمال عناصر الواجهة الفولتضوئية من دون تكاليف إضافية مقارنة بالواجهات التقليدية. وهذا يعني أن الكهرباء الفولتضوئية من هذه الواجهات تقريباً مجانية. والواجهات الفولتضوئية تُنشِّط خيال ورغبات المهندسين المعماريين أيضاً: الخلايا الشمسية الملونة، والتركيبات البلورية شبه الغرانيت، والتشكيل الإطاري المثلثي والسداسي، وحتى ترتيبات المنظومة الفولتضوئية ذات النوع الفسيفسائي ظهرت في السنوات الأخيرة (انظر الشكل (10-11)). ومظهر اللون المختلف تم تحقيقه بتغيير الطلية المضادة للانعكاس للخلية الشمسية (انظر (Mason [et al.] 1995)).



الشكل (10-11): واجهة فولتضوئية مجهزة بمنظومات فولتضوئية متعددة البلورة ونوافذ مرتبة على شكل لوحة الشطرنج (شوهدت في "ستادت ويرك آخن" (Stadtwerke Aachen)).



الشكل (10-12): واجهة فولتضوئية في مبنى أوكوتيك (Ökotec) ببرلين ـ كريوزبرغ (Berlin-Kreuzberg) (الأيمن) مع واجهة تاريخية من متحف جروندزيت (Gründerzeit)

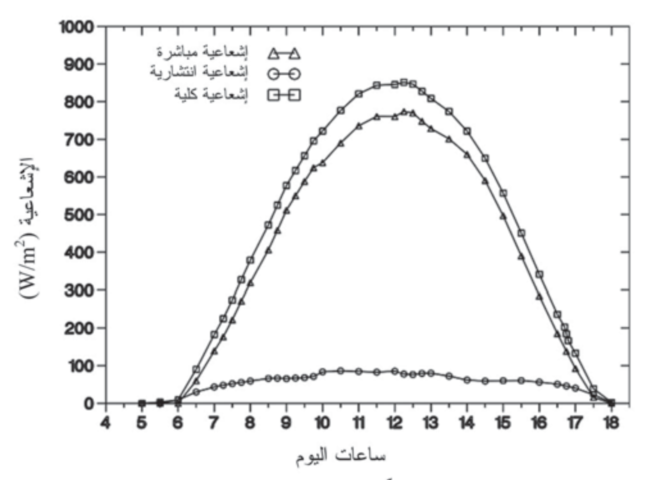


الشكل (10-13): واجهة بمنظومات فولتضوئية كحواجب للنوافذ للتقليل من حِمل مكيف الهواء وكزخارف (شوهدت في سولاروورلد (Solarworld) في مدينة فريبرغ، ساكسوني (Saxony)).

10-4 التحسين الحراري للمكونات الفولتضوئية

10-4-1 درجات حرارة التشغيل الحقيقية للخلية تحت الظروف المدارية

لمعرفة المزيد عن خصائص التشغيل الحقيقية لظروف المناخ المداري، وبخاصة عن درجات حرارة الخلية والقدرة المُخرَجة (عند «نقطة القدرة القصوى»)، تم دراسة منظومة (M55 من إنتاج مصانع SSI) في معامل الفولتضوئية التابعة لجامعة ريو دي جانييرو الفيدرالية (UFRJ) بالبرازيل (S ’22°54، W ’43°13)، خلال الاعتدال /1994/9) (22. وقد تم تسجيل الإشعاعية (الأفقية الكلِّية، والمباشرة، والانتشارية) لذلك اليوم كما هو مبيّن في الشكل (10-14).



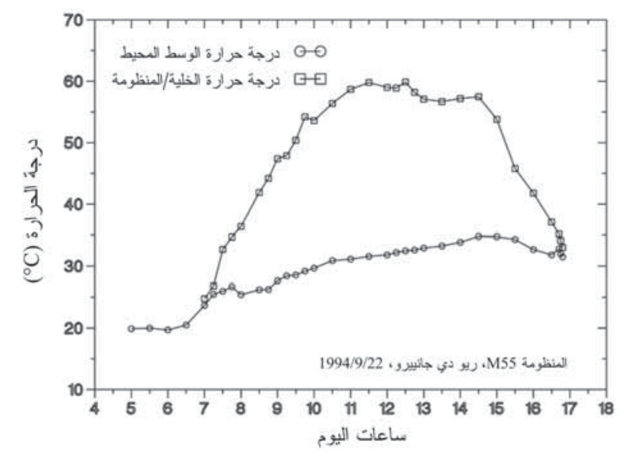
الشكل (10-14): الإشعاعية الأفقية الكلّية، والمباشرة، والانتشارية في الاعتدال (1994/9/22) في مدينة ريو دي جانييرو بالبرازيل (S '54°22، W '13°43).

يبيّن الشكل (10-15) قيم درجات الحرارة المقاسة للمنظومة M55 خلال ذلك اليوم الخالي من الرياح تقريباً. كانت المنظومة مواجهة للشمال وبزاوية ارتفاع 23º لمستوى المنظومة. ونقطة القدرة القصوى تم تعقبها يدوياً بواسطة مقاومة متغيرة باستخدام أميتر رقمي، وفولتميتر رقمي، وآلة حاسبة. وقد تم التمكن من إجراء القياسات الحرارية والكهربائية فقط بعد الساعة 6:45 صباحاً، نتيجة لقيود الدخول إلى الموقع، وليس بعد الساعة 4:45 مساءً، نتيجة لتظليل المولد جزئياً بواسطة المباني المجاورة. الطاقة الكهربائية المُخرَجة المقاسة للمنظومة كانت 300 Wh، بينما درجة الحرارة الثابتة 25 ºC للخلية، المطلوبة في ظروف الفحص المعيارية (STC)، تسببت في مردود أعلى بمقدار 12 في المئة (انظر الشكل (10-16)).

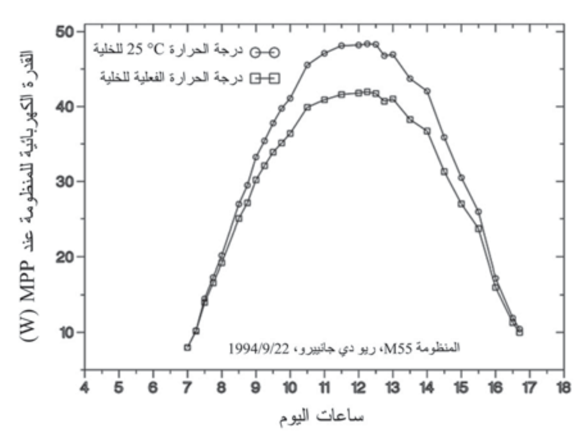
10-4-2 الأبحاث التمهيدية على خفض درجات الحرارة في المنظومات الفولتضوئية

الأبحاث على زيادة كفاءة الفولتضوئية والقدرة الكهربائية

المُخرَجة عن طريق خفض درجة حرارة التشغيل للخلية تم إجراؤها من قِبَل مؤلف الكتاب منذ عام 1989 في أطروحة دكتوراه (انظر Krauter, 1993c).



الشكل (10-15): درجات الحرارة المقاسة للمنظومة والوسط المحيط في المنظومة M55 في مدينة ريو دي جانيرو بالبرازيل، ليوم 1994/9/22 الخالي من الرياح.



الشكل (10-16): القدرة الكهربائية المُخرَجة المقاسة لظروف حقيقية مقارنة بالقدرة المُخرَجة النظرية عند درجة حرارة ثابتة 25 °C للخلية (ظروف "نقطة القدرة القصوى" (MPP) لكِلا المنحنيين).

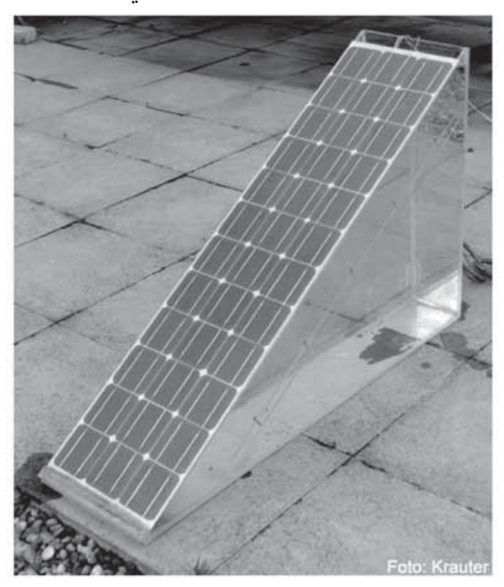
استهلاك الطاقة لنظام تبريد فاعل لن يعوَّض بكسب في توليد الطاقة الزائدة، على الأقل للأنظمة الصغيرة. وتم الحفاظ على درجات حرارة التشغيل عند مستويات منخفضة عن طريق تركيب المنظومة على خزان مملوء بالماء. هذا الإجراء أدى إلى خفض فعّال في درجات حرارة التشغيل للخلية من دون إنفاق أيّ طاقة للتبريد. يقوم الماء عملياً بامتصاص التدفق الحراري المتولد بواسطة المنظومة. ونتيجة السعة الحرارية العالية للماء المشارك ، تزداد درجة الحرارة تدريجياً (انظر النتائج أدناه). كما إن درجة الحرارة القصوى تتزحزح من منتصف اليوم إلى بعد الظهر. وقد تم إثبات الفكرة والتحقق من صحتها بنماذج مختلفة تم بناؤها خلال السنوات السابقة في أوروبا وفي أفريقيا.

خلفية تاريخية - جهاز التبريد الأول، الذي خضع لفكرة «التبريد بالسعة الحرارية الممتدة»، تم بناؤه في عام 1992 . كان الخزان مدمجاً في التشكيل الإطاري الأصلي للمنظومة الفولتضوئية M55 المصنَّعة من قِبَل SSI (Siemens Solar Industries سابقاً، و Shell Solar حالياً) وبحجم 12 لتراً، وبالتالي يمكن استخدامه مع التركيب التقليدي. هذا النموذج أظهر زيادة قدرها 2.6 في المئة في المردود اليومي للطاقة الكهربائية. والاختبارات اللاحقة، التي استعملت مادة خازنة للحرارة الكامنة (كبريتات الصوديوم)، أظهرت نتائج أفضل بكثير إلاّ أنها أدت إلى تآكل حاد (انظر Krauter, 1993c).

10-4-3 تطوير نموذج محسَّن حرارياً

النموذج الثاني المبني في عام 1994 كان له خزان ماء أكبر، مما خدم أيضاً كقاعدة للمنظومة، وكحامل لها، وكبنية تركيبية (منظومة فولتضوئية محسَّنة حرارياً بحامل مدمج Thermal Enhanced PV) (Module with Integrated Standing) (TEPVIS) . تم اختبار النموذج

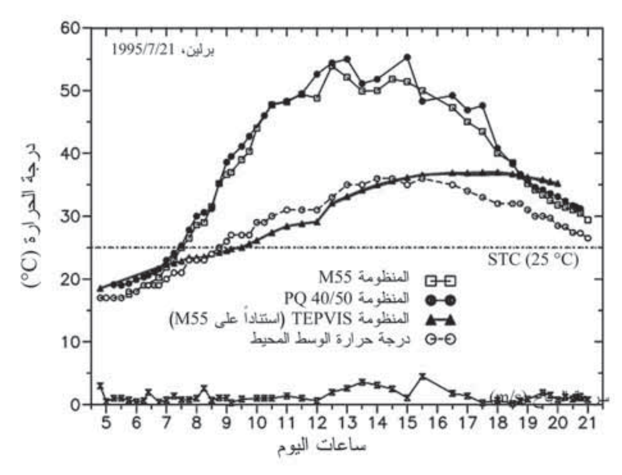
مع المنظومة M55 في برلين (انظر الأشكال (10-17)، و(10-18)، (10-19)) وأظهر كسباً في الطاقة بلغ 12 في المئة، ومع المنظومات PQ 10/40 في مدينة بولاوايو بزمبابوي وأظهرت كسباً بلغ 9.5 في المئة. كان الكسب في زمبابوي أقل نتيجة بالنسبة إلى خفض دوران الماء وزيادة تطبُّقه (الطبقة العليا للماء أصبحت أكثر دفئاً من الطبقة السفلى). وميل مستوى المنظومة في زمبابوي كان منخفضاً جداً (20º، وفقاً لخط طول بولاوايو)، ما قلل من تأثير السيفون الحراري. المنظومة التي كانت في برلين تم تجهيزها أيضاً بلوح إضافي داخل الخزان، موازياً للمنظومة وعلى مسافة 12 cm من سطحها، مشكّلاً ما يشبه المدخنة ما حسّن من دوران الماء (فاصل «أونيكين» (Onneken)). ومع ذلك، كانت كفاءة تحويل الفولتضوئية للمنظومة المبرَّدة أعلى بشكل ملحوظ من الفولتضوئية المرجعية خلال ما لا يقل عن 95 في المئة من اليوم.



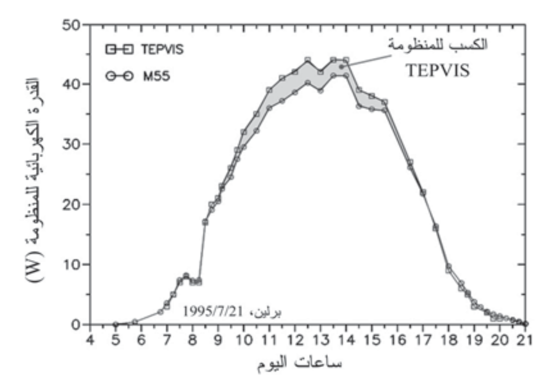
الشكل (10-17): منظومة فولتضوئية محسَّنة حرارياً بحامل مدمج (TEPVIS): نموذج "إثبات الفكرة" مصنوع الأكريليك أظهر كسباً 11.6% في المردود الكهربائي (برلين، ألمانيا، 1995).

للتخلص من أخطاء القياس المحتملة، التي قد تنتج من اختلاف الخصائص الكهربية للأنظمة، تم التبديل بين جميع المنظومات (المرجعية والمبرَّدة) وإعادة اختبارها. وقد تم تشغيل المنظومات بشكل مستمر عند «نقطة القدرة القصوى» بالتعقُّب اليدوي لمقاومة الحِمل مع أجهزة قياس القدرة. وتم التطبيق على «النظام المنزلي الشمسي المتكامل» -Integrated Solar Home System (I-(SHS)) الجديد خلال الربع الأول من عام 2002.

10-4-4 اختبارات النموذج



الشكل (10-18): درجات الحرارة للمنظومة TEPVIS مقارنة بمنظومتين فولتضوئيتين تقليديتين (MP55، PQ 10/40)، جميعها تم تشغيلها عند نقطة القدرة القصوى، مع درجة حرارة الوسط المحيط وسرعة الرياح ليوم صافي في برلين بألمانيا (7/21/1995).



الشكل (10-19): القدرة الكهربائية المُخرَجة للمنظومة TEPVIS مقارنة بمنظومة تقليدية M55 بتركيب تقليدي، وكلاهما عند نقطة القدرة القصوى (لظروف الاختبار نفسها المذكورة أعلاه). الكسب في مردود الطاقة الكهربائية هو 11.6%.

10-4-5 بناء وتشغيل وقياس المنظومة TEPVIS في أفريقيا

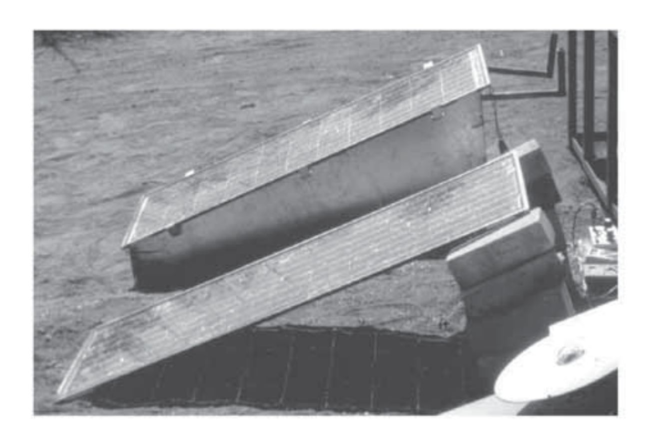
في أيلول/ سبتمبر 1995 تم طلب خزان المنظومة TEPVIS من ورشة حدادة في هراري بزمبابوي. المادة المستخدمة للبناء كانت فولاذ مجلفن[1] (Galvanized) (انظر الشكل (10-20)).



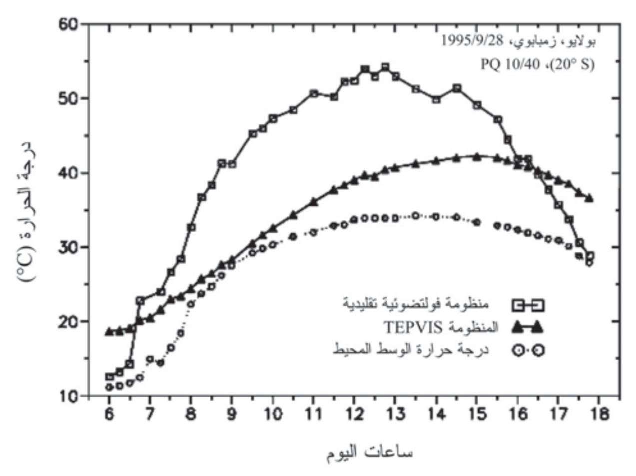
الشكل (10-20): خزان لخفض درجة حرارة الخلية ويخدم كقاعدة/حامل للمنظومة، صُنع في مدينة هراري بزمبابوي من فولاذ مجلفن (من دون دعم للحمل الحراري الداخلي).

(1) استخدام الفولاذ المقاوم للصدأ ربما سيكون ملائماً بشكل أكبر من حيث العمر الزمني الخدمي للنظام، إلاّ أنه للفترة الزمنية المحدودة للاختبار (3 أشهر كحد أقصى) اعتبرنا أن الفولاذ المجلفن كافياً.

وقد تم اختيار منظومتين فولتضوئيتين PQ 10/40 متعددة البلورة (من إنتاج تيليفنكن (Telefunken) سابقاً، ASE-Schott/RWE حالياً) من بين 12 منظومة، وفقاً لتيارات دائرة القِصَر نفسها وجهود الدائرة المفتوحة (انظر الشكل (10-21)). للتخلص من أخطاء القياس المحتملة حتى الصغيرة منها، تم التبديل بين المنظومات وإعادة اختبارها بعد كل يوم من القياسات. تبيّن الأشكال أدناه متوسط قيم هذه القياسات. ونقطة القدرة القصوى تم تعقبها يدوياً بواسطة أجهزة قياس القدرة ومقاومة الحِمل المتغير. كما تم قياس الإشعاعية بواسطة جهاز قياس الإشعاع السماوي (البيرانومتر) (Pyranometer) BM5.



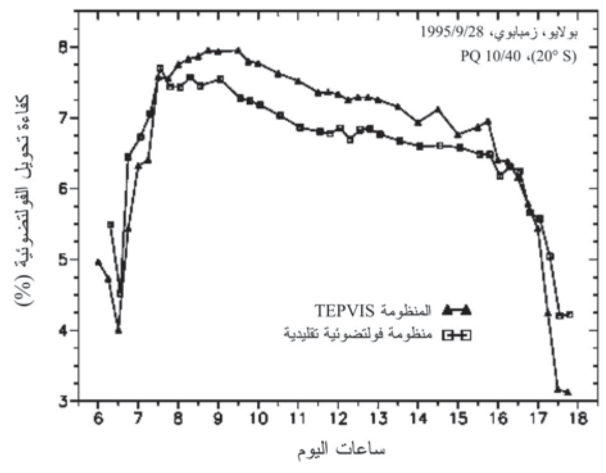
الشكل (10-21): قياس مقارنة للمنظومة TEPVIS (الخلفية) بمنظومة فولتضوئية مرجعية معيارية (الأمامية)، كلاهما استناداً إلى المنظومة PQ 10/40 مع بيرانومتر BM5 في أثناء إجراء القياسات في زمبابوي في عام 1995.



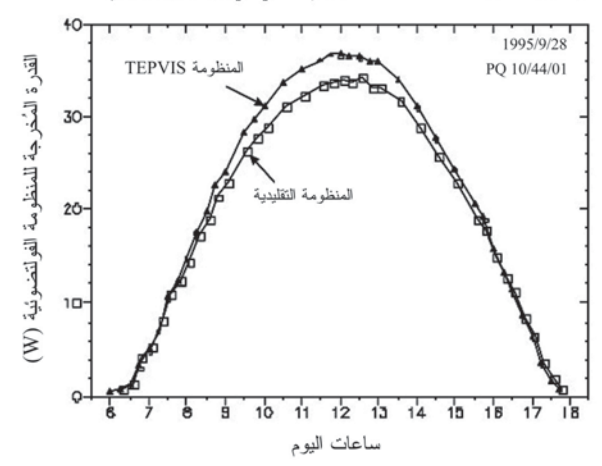
الشكل (10-22): مقارنة درجات الحرارة لمنظومة فولتضوئية تقليدية متعددة البلورة بالمنظومة TEPVIS (كلاهما استناداً إلى المنظومة PQ 10/40) خلال يوم صافي في بولايو بزمبابوي (S '10°20، E '37°38).

توضح الأشكال (10-23)، (10-24)، (10-25) نتائج الاختبارات التي أُجريت في بولايو بزمبابوي. وبالرغم من ظروف الطقس المواتية الهادئة - ليالي باردة نسبياً ونهار من دون سحب (ولكن بنسمات) - إلاّ أنه لم يكن ممكناً إحراز الكسب الذي تم تحقيقه في برلين بألمانيا: الزيادة في المردودات للمنظومة TEPVIS (من دون تحسينات بصرية) للتنصيب التقليدي (لمتوسط اختبارين مع تبديل المنظومات الشمسية) بلغ 6.4 في المئة فقط. أسباب الكسب المنخفض يمكن إيعازها إلى الميل الأكثر استواءً للمنظومة (زاوية ارتفاع 20º بدلاً من 33º)، وغياب «معجِّل الحِمل الحراري» (لوح طوله 2/3 من طول المنظومة، مركَّب داخل الخزان موازياً لسطح المنظومة على مسافة 15 cm منه). وكلتا الحقيقتين خفّضا الحِمل الحراري داخل الخزان وأدّيا إلى تطبُّق حراري عالٍ (حوالى 10 K فرق في درجة حرارة بين المستويين العلوي والسفلي للخزان)، الذي أدى إلى درجات حرارة تشغيل أعلى للمنظومة. لتفادي التأثيرات السلبية للتطبُّق، هناك تحت الإنشاء تصميم

جديد بخزان له الأجزاء الرئيسة للخزن نفسها يقع أعلى المنظومة. ومن جهة أخرى، يجب دراسة ما إذا كان تأثير خفض التكلفة من خلال استبدال القاعدة الإسمنتية بخزان لا يزال ممكناً بذلك التصميم الجديد.



الشكل (10-23): مقارنة كفاءة تحويل الفولتضوئية لمنظومة فولتضوئية تقليدية متعددة البلورة (PQ 10/40) بالمنظومة TEPVIS خلال يوم صافي في بولايو بزمبابوي.

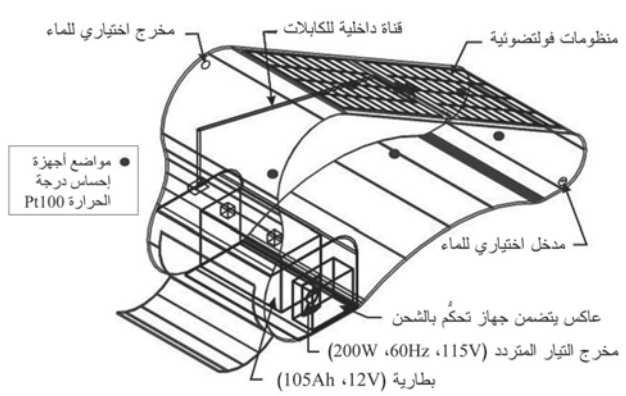


الشكل (10-24): القدرة الكهربائية المُخرَجة عند نقطة القدرة القصوى للمنظومة TEPVIS خلال يوم صافٍ مقارنة بمنظومة فولتضوئية تقليدية (بولايو، زمبابوي، 20°10' S، 38°37' E).

10-4-6 النظام المنزلي الشمسي المتكامل

10-4-6-1 مكونات النظام

تم تنفيذ المشروع من قِبَل فابيان أوخس (Fabian Ochs)، طالب ماجستير تحت إشراف مؤلف الكتاب، خلال العامين 2002/2001. يوضح الشكل (10-25) المخطط الأساسي للنظام: يتكون المولد الفولتضوئي من منظومتين $30\ W_p$ لاإطاريتين متصلتين على التوازي. وداخل بنية القاعدة توجد بطاريات حمض الرصاص عديمة الصيانة (12 V، 105 Ah) وعاكس جيبي 200 W (115 V، 60 Hz) مع جهاز مدمج للتحكُّم بالشحن (6 A). ويقوم خزان الماء بتبريد المكونات. وأطراف الخرج موصَّلة إلى مأخذ (قابس) تيار متردد عادي. وجميع المكونات محتواة في خزان من الألياف الزجاجية وراتينج الإبوكسي (Epoxy Resin) المضاد للماء. وهذا النموذج طوله 1.37 m، وارتفاعه 0.76 m، وعمقه 0.5 m، وحجمه $0.3\ m^3$. ويمكن نقل النموذج بسهولة عندما يكون فارغاً (20 kg)، ويتم تثبيته عندما يكون مملوءاً بالماء في موقع التنصيب (320 kg) من دون الحاجة إلى تثقيب أرضية السقف (انظر الشكلين (10-25) و(10-26)).



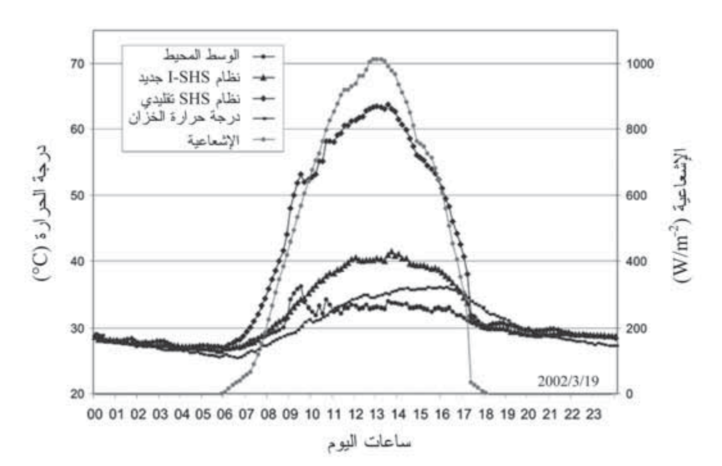
الشكل (10-25): التركيب الداخلي للنظام المنزلي الشمسي المتكامل (I-SHS).



الشكل (10-26): نموذج النظام المنزلي الشمسي المتكامل في أثناء الاختبارات في كوباكابانا، ريو دي جانييرو. تصميم معدل من "مدرسة الفنون الجميلة" بجامعة UFRJ، ريو دي جانييرو.

تم اختيار الزاوية 30º لارتفاع المنظومة لإحراز مردود جيد حتى في الشتاء في معظم الأجزاء من البرازيل. وحجم الخزان تقريباً 300 liters، ويساوي 300 kg، عندما يكون مملوءاً بالماء. ويعمل الخزان كمبرِّد فعال للمنظومات الفولتضوئية. ويسمح الألمنيوم الموجود في الجهة الخلفية من المنظومات الفولتضوئية بانتقال الحرارة بشكل جيد إلى الماء المخزون في الخزان. ويقوم الماء، من خلال سعته الحرارية العالية، بتحديد درجات حرارة الخلية إلى مدى قريب من درجات حرارة الوسط المحيط (انظر الشكل (10-27)).

الزيادة في درجة حرارة الخلية بالنسبة إلى درجة حرارة الوسط المحيط قيست لعدة أيام في ريو دي جانييرو خلال شهر آذار/ مارس 2002 ومبيّنة في الشكل (10-28) كدالة في الإشعاعية مقارنة بالقيم المكافئة لأنظمة منزلية شمسية تقليدية (SHS) (انظر Messenger and Ventre, 2000)، و(Krauter, 1998)، و(Krauter and Schmid, 1999).



الشكل (10-27): قياسات درجة الحرارة لنظام منزلي شمسي متكامل (I-SHS) خلال يوم صاف (انظر "الإشعاعية"): درجة حرارة المنظومة السفلى ("I-SHS جديد") ودرجة حرارة الماء في الجزء العلوي من الخزان ("درجة حرارة الخزان") مقارنة بنظام SHS تقليدي ودرجة حرارة الوسط المحيط.

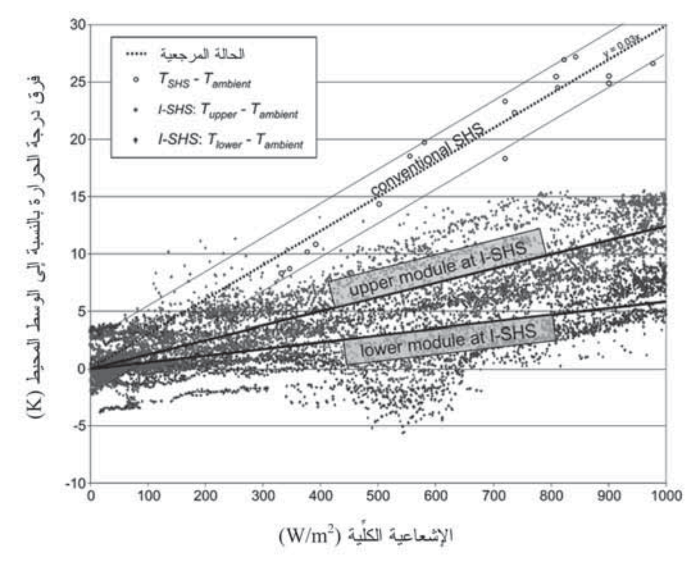
بالرغم من القيم الواسعة الانتشار نسبياً، وبشكل أساسي بسبب تغيرات سرعة الرياح، يمكن استنتاج العلاقات التقريبية الخطية الآتية:

$$T_{conv.SHS} - T_{ambient} = 0.03 \cdot G \; \left(\mathrm{K} \cdot (\mathrm{W/m^2})^{-1}\right)$$

$$T_{I\text{-}SHS\,upper} - T_{ambient} = 0.012 \cdot G \; \left(\mathrm{K} \cdot (\mathrm{W/m^2})^{-1}\right)$$

$$T_{I\text{-}SHS\,lower} - T_{ambient} = 0.0058 \cdot G \; \left(\mathrm{K} \cdot (\mathrm{W/m^2})^{-1}\right)$$

حيث إن G هي الإشعاعية الكلِّية، وT_{SHS} درجة حرارة تشغيل المنظومة للنظام المنزلي الشمسي التقليدي (SHS) («الحالة المرجعية») بحسب ما قيست (Krauter , 1998)، و(Krauter and Schmid, 1999) أو أعطيت في المراجع العلمية 2000، و(Krauter and Hanitsch, 1996). وT_{upper} هي درجة حرارة المنظومة العليا وT_{lower} درجة حرارة المنظومة السفلى في النظام المنزلي الشمسي المتكامل (I-SHS). جميع درجات الحرارة معطاة بالكلفن (K) أو الدرجة المئوية (ºC).



الشكل (10-28): الفرق بين درجة حرارة المنظومة والوسط المحيط مقارنة بالحالة المرجعية (التقليدية SHS) مرسوم كدالة في الإشعاعية.

في تجارب سابقة، كان الانخفاض في درجات حرارة الخلية خلال فترة التشغيل يؤدي إلى زيادة المردود الكهربائي بمقدار يصل إلى 12 في المئة (Krauter, 1995)، و(Krauter, 1996). ونتيجة للتطبُّق الملاحظ، فإن المنظومة I-SHS أظهرت كسباً 9 في المئة فقط. إجبار دوران الماء في الخزان سيؤدي بالتأكيد إلى مردودات كهربائية أعلى، ومن ناحية أخرى، يخدم التطبُّق بشكل جيد جداً على الاستخدام الاختيار للنظام. بالإضافة إلى ذلك، فإن الماء الساخن المتولد يكفي لاستهلاك أسرة صغيرة في البرازيل. ويمكن استبدال المنظومة السفلى أيضاً بماصّ حراري وسيرفع من توليد الماء الساخن.

لأغراض الاختبار تم صناعة نموذج واحد. الإنتاج الواسع للأنظمة المنزلية الشمسية المتكاملة (I-SHS) (مثلاً بواسطة

البوليبروبيلين أو البوليثيلين المعاد تدويرهما) سيكون سريعاً ورخيصاً بتكاليف إنتاج أقل من 50 يورو للإنتاج الواسع. ومشاكل المادة المتعلقة باستقرار الأشعة فوق البنفسجية وتجفيف البلاستيك تبدو أنها ستُحل ـ منتجو الخزانات المماثلة (المستخدمة كأحواض عائمة للقوارب) يقدمون ضمانات لعشر سنوات. وشكل النموذج يتم تشكيله من قالب من البوليستيرين الموسع. بعد ذلك، يتم تصفيح الخزان الحاوي، المتكون من ستة أجزاء، باستخدام ألياف زجاجية وراتنج الإبوكسي. وللسماح بإجراء تعديلات، يتم تركيب المنظومات بطريقة قابلة للفصل. كما يتم تركيب قناة للكابلات خلال الخزان لتسهيل عملية الصيانة. إضافة إلى ذلك، فإن الدمج المثبَّت للمنظومات الفولتضوئية ضمن الخزان سيعطي أداء محسّناً. وزمن بناء النموذج كان أقل من أسبوع، وتكاليف المواد للنموذج كانت 420 يورو.

10-4-6-2 موازنة تكاليف النظام

حيث إنه لم تعد هناك حاجة للقاعدة، وبنية الدعامة، وأدوات التركيب، سيتم تحقيق خفض كبير في تكاليف التنصيب وتكاليف النظام «جاهزاً». بالسمات المحسّنة للصيانة ومردودات الطاقة الأعلى، تصبح الكهرباء الفولتضوئية أكثر توفراً. فبمجرد وضع النظام المنزلي الشمسي المتكامل (I-SHS) في الموقع المناسب، ينبغي ملؤه بالماء فقط وسيكون جاهزاً على الفور بإمداد القدرة الكهربائية إلى أيّ جهاز يعمل بالتيار المتردد من المأخذ المعياري فيه. وزن الخزان الحاوي، من دون العاكس الكهربائي والبطارية، هو حوالى سبعة كيلوغرامات، ما يجعل عملية نقله سهلة. وعند ملئه بالماء يصبح وزن الحاوي أكثر من 300 kg، ما يجعل النظام مستقراً لمقاومة أيّ عاصفة من دون مثبتات إضافية. وبمجرد أن يوضع في المكان

المناسب، يكون النظام I-SHS جاهزاً على الفور بإمداد أحمال تعمل بالتيار المتردد (إضاءة، مراوح، مذياع... إلخ). إضافة إلى ذلك، فالنظام قادر على توفير الماء الساخن المطلوب لمنزل صغير. ويمكن دمج عدة أجهزة لتحقيق احتياجات القدرة الأعلى من دون إعادة تصميم النظام. فمن دون تحمل تكاليف أعلى من النظام المنزلي الشمسي التقليدي (SHS)، والعرض الملائم لموازنة تكاليف النظام، والتوليد الأكثر للطاقة، فإن النظام I-SHS هو وسيلة فعالة لإنارة المناطق البعيدة.

10-4-6-3 فوائد النظام المنزلي الشمسي المتكامل

- سهولة التنصيب.
- خفض بارز لتكاليف النظام.
- كفاءة مرتفعة عن طريق درجة حرارة التشغيل المنخفضة للخلية.
- ثقة عالية من خلال الوحدات المصنَّعة مسبقاً والمجرَّبة مسبقاً.
- مخرج تيار متردد معياري (ميزة «التوصيل والتشغيل»).
- استخدام اختياري للماء الساخن كناتج إضافي.

10-4-6-4 تطويرات إضافية

جميع التحسينات المقترحة بمجملها تؤدي إلى كسب في المردودات الكهربائية بين 15-17 في المئة. وفي الوقت نفسه، فإن تكاليف الأنظمة يمكن خفضها بمقدار 10-15 في المئة عن طريق التجميع المسبق للنظام وعن طريق تكاليف التنصيب المخفضة. وفي النهاية، فإن تكاليف توليد الفولتضوئية يمكن خفضها بمقدار 28-38 في المئة. والنظام المشيّد يمكن أن يكون آمناً بيئياً: إعادة التدوير ممكنة بشكل كامل لجميع المواد والمكونات (الزجاج، والسليكون، والبوليثيلين). والمواد الخام متوفرة بشكل غير محدود (الزجاج

والسليكون)، أو يمكن صناعتها من مواد معاد تدويرها (البوليثيلين). والمنتَج له عمر زمني خدمي طويل كما إنه خالٍ من الصيانة.

تكاليف إنتاج بنية البوليثيلين هي حوالى 80 يورو للإنتاج الواسع، و250 يورو للإنتاج الضيق النطاق (100 قطعة في السنة)، آخذين في الاعتبار التكاليف الأولية 7000 يورو للتشكيل بالسَّحب العميق أو للقولبة بطريقة التشكيل بالبثق. وحيث إن تكاليف العمالة أقل كثيراً في العالم الثالث، فإن تصنيع النظام المنزلي الشمسي المتكامل هناك سيكون ملائماً جداً، وهذا أيضاً من أجل إيجاد فرص عمل.



الفصل الحادي عشر

الخلاصة

تؤدي الزيادة الحادة في الاستهلاك البشري للطاقة إلى ارتفاع أسّي في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المتعلقة بالأنواع الحالية السائدة لتقنيات الطاقة. وتوازن التبادل الإشعاعي بين سطح الأرض والفضاء قد تغيّر بسبب الزيادة الكبيرة في محتوى ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي للأرض كما هو ملاحظ خلال العقود الماضية؛ ويحدث التوازن حالياً عند درجات حرارة أعلى لسطح الأرض. وهذا ناتج من انخفاض النفاذية البصرية للغلاف الجوي للأرض في مدى الأشعة تحت الحمراء، والذي يحدث عنده الإشعاع الحراري من الأرض، بينما الطيف الشمسي الذي يصل إلى الأرض يظل غير متغير نسبياً. تأثيرات تلك الزيادة لدرجة الحرارة، مثل زيادة الفيضانات والأعاصير، تتسبب في أضرار إضافية بحوالى 50 بليون دولار أميركي سنوياً، وقد تم عكسها اليوم في إحصائيات ميونيخ لإعادة التأمين. وعلى هذه الخلفية، فإن الحاجة إلى فحص أنظمة تزويد الطاقة الحالية من حيث شدتها في ثاني أكسيد الكربون في أثناء دورة حياتها أصبح واضحاً.

في هذا الكتاب، قمنا بفحص توازنات الطاقة وثاني أكسيد الكربون لمحطات القدرة الفولتضوئية في أثناء دورة حياتها، بما في ذلك الإنتاج، والتشغيل، والتفكيك، وإعادة الاستخدام.

العوامل المؤثرة في هذا التوازن، مثل المواد الخام، والإنتاج، وظروف التشغيل، والمردود والحصص النسبية لإعادة التدوير، اعتُبِرت على النحو الآتي:

- ما تم أخذه في الحسابات هو الإنفاقات على إنتاج محطات القدرة الفولتضوئية، آخذين في الاعتبار المكونات المحدَّدة لمادتها وظروف عمليات الإنتاج، حتى للمواد الخام تلك.
- في أثناء مرحلة التشغيل، جميع العوامل التي لها تأثير في المردود الكهربائي لمحطة القدرة الفولتضوئية، مثل الإشعاعية الواصلة إلى الخلية ودرجة حرارة التشغيل، تم نمذجتها ودراستها بالتفصيل. وقد تم تقديم واختبار عدة مقترحات للتحسينات.
- استخدام المادة المعاد تدويرها لها تأثير مهم في إنفاقات الطاقة للتصنيع: الاستخدام الاستثنائي للمواد الثانوية يؤدي إلى توفير للطاقة قدره 92 في المئة للألمنيوم، و73 في المئة للنحاس، و67 في المئة للزجاج. وهذه المقادير ليست نظرية فقط؛ ففي الوقت الحاضر، بلغت حصص إعادة التدوير الصناعية (في ألمانيا) في حدود 31 في المئة إلى 35 في المئة (وإلى حد 87 في المئة في قطاع الهندسة الكهربائية) للألمنيوم، و48 في المئة إلى 55 في المئة للنحاس، و45 في المئة للزجاج.

وإذا أعيد تدوير محطة القدرة الفولتضوئية بعد تفكيكها في نهاية عمرها الزمني للاستخدام، فإن إنفاقات الطاقة المتعلقة بالمادة تقوم بخفض نفسها مرة أخرى. وأوضحت الاختبارات الأولية بأن إنفاق الطاقة للخلايا الشمسية يمكن خفضه بمقدار واحد إذا استُخدِمت مادة معاد تدويرها. ونتيجة للبيانات غير الكافية في المؤسسات الصناعية، فإنه لم يكن ممكناً إجراء تحليل تفصيلي لهذا التأثير أيضاً. ونمذجة توازن ثاني أكسيد الكربون معقد جداً. لإنتاج محطة قدرة فولتضوئية، ومكوناتها، وموادها الخام، فإن شدة ثاني أكسيد الكربون لبلد

الإنتاج يجب أن تؤخذ في الحسابات. في أوروبا، الانبعاثات المناظرة المحددة لثاني أكسيد الكربون يمكن أن تختلف بعامل قدره 27.6 (هولندا عند 442 g/kWh مقابل النرويج عند 16 g/kWh). والتجارة العالمية المتزايدة، حيث إنه نادراً ما تكون مواقع إنتاج وتطبيق معظم المواد، والمكونات، والمنتجات قريبة من بعضها، مع الميل إلى تغيير البائعين بشكل متكرر، تجعل التصريح الثابت والأكيد حول توازن ثاني أكسيد الكربون محيّراً.

وفقاً للظروف الأساسية الحالية، فإن المقارنة النموذجية بين ألمانيا والبرازيل تبيّن بأن الخفض الأعلى لثاني أكسيد الكربون ($26,805\ kg/kW_p$ لمحطة قدرة فولتضوئية تم تنصيبها) لوحظ في إنتاج محطات القدرة الفولتضوئية في البرازيل والاستبدال المحلي لمولدات الديزل غير المتصلة بالشبكة بمحطات قدرة فولتضوئية تستند إلى تقنية السليكون أحادي البلورة. وللإنتاج والتنصيب في ألمانيا، فإن محطات القدرة المستندة إلى خلايا شمسية متعددة البلورة لها بعض القدرات الأفضل لخفض ثاني أكسيد الكربون: $8,677\ kg/kW_p$ مقابل $7,792\ kg/kW_p$ بالتقنية الأحادية البلورة.

مثل هذه الحسابات تعتبر مهمة لتجارة الكربون: وفقاً لظروف الجانب غير المواتي، على سبيل المثال الإنتاج في ألمانيا (بشدتها العالية نسبياً في ثاني أكسيد الكربون البالغة 0.56 kg/kWh) والتنصيب بالتوصيل الشبكي في البرازيل (بشدتها المنخفضة جداً في ثاني أكسيد الكربون)، فإن تطبيق الفولتضوئية ربما يؤدي إلى خفض سالب لثاني أكسيد الكربون أيضاً: $1009\ kg/kW_p$- (أسوأ الأحوال).

وجميع البيانات تم حسابها بافتراضات معتدلة لحصة إعادة التدوير (25 في المئة) ولتصنيع المواد الخام (فقط الإنتاج المحلي). والتوازن يمكن أن يتأثر بشكل إيجابي من خلال استيراد المواد الخام

من دول بمزيج طاقة ملائم (مثلاً، النرويج وأيسلندا).

لمزيد من التحسين في خفض ثاني أكسيد الكربون من قِبَل محطات القدرة الفولتضوئية، فقد افتُرِضت إجراءات إضافية، ومحاكاتها، واختبارها: عن طريق التوقّع الدقيق للمردود، آخذين في الاعتبار جميع العوامل البصرية، والحرارية، والكهربائية ذات الصلة، كما إن نفقات التخطيط يمكن خفضها إلى حد كبير من خلال الخفض إلى حد أدنى لعدم اليقين في المردود. إلى جانب النمذجة، فإن الإجراءات العملية، وبشكل أساسي ذات الطبيعة البصرية والحرارية، قد تم افتراضها بأنها ستزيد من المردود الكهربائي لمحطة القدرة الفولتضوئية.

فرضيات النموذج النظري تم التمكن من إثباتها عن طريق القياسات العملية في أستراليا، والبرازيل، وألمانيا، وزمبابوي. أمثلة: الفقد بالانعكاس للإشعاعية يمكن خفضه من خلال التوافق الأفضل لمعاملات الانكسار، وتطبيق التركيبات البصرية سوف يعمل على توليد أكبر للكهرباء بحوالى 4 في المئة. وخفض درجة حرارة التشغيل للمولدات الفولتضوئية بواسطة السعات الحرارية العالية (خزان الماء) يؤدي إلى كسب للمردود الكهربائي قدره ما بين 6 في المئة إلى 12 في المئة. إضافة إلى ذلك، فإن استبدال القاعدة الإسمنتية التقليدية بخزان الماء يؤدي إلى خفض في المادة ونفقات العمالة. ولهذا المردود نفسه، فإن المولد الكهربائي الأصغر يصبح ضرورياً، ما يؤدي إلى خفض أكبر للمادة ومتطلبات الطاقة للإنتاج، وبالتالي يزيد من إمكانية خفض ثاني أكسيد الكربون في أثناء دورة الحياة لمحطات القدرة الفولتضوئية.

الفصل الثاني عشر

الملحق

E	الطاقة الإشعاعية (المعيار الأوروبي)	$W \cdot m^{-2}$
E_0	الإشعاعية خارج الغلاف الجوي للأرض	$W \cdot m^{-2}$
E_{diff}	الإشعاعية الانتشارية	$W \cdot m^{-2}$
E_{dir}	الإشعاعية المباشرة	$W \cdot m^{-2}$
E_{cell}	الإشعاعية الواصلة إلى الخلية	$W \cdot m^{-2}$
EG-Si	سليكون ذو درجة إلكترونية/شبه موصلة (بنقاوة 99.99999 في المئة)	
ERZ	زمن استرداد الطاقة	
EVA	أسيتات–فينيل–الإثيلين (بوليمر مشترك)	
FF	عامل التشكُّل	
FZ	المنطقة الطافية	
G	عجلة الجاذبية الأرضية ($9.8067\ m \cdot s^{-2}$)	$m \cdot s^{-2}$
G	الإشعاعية (المعيار الأميركي)	$W \cdot m^{-2}$
GaAs	زرنيخيد الجاليوم	
Ge	الجرمانيوم	
Gr	عدد جراشوف	
h	ثابت بلانك ($6.626 \times 10^{-34}\ J \cdot s$)	$N \cdot m \cdot s$
h	معامل الانتقال الحراري	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
h	الارتفاع (أعلى مستوى سطح البحر)	m
HR	الرطوبة النسبية	%
H_2	جزيء الهيدروجين	
He	الهيليوم	
I_D	تيار حالة التوصيل (تيار أمامي) ($I_D = 0.1\ I_{max}$)	A
I_{photo}	تيار الحث الضوئي	A
I_{mp}	التيار عند نقطة القدرة القصوى	A
I_{sc}	تيار دائرة القِصَر	A
IR	الأشعة تحت الحمراء ($\lambda > 800$ nm)	
k	الموصلية الحرارية	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
k	ثابت بولتزمان ($1.3807 \times 10^{-23}\ J \cdot K^{-1}$)	$N \cdot m \cdot K^{-1}$
k	الجزء التخيلي لمعامل الانكسار المركَّب (معامل الاندثار)	

KEA	متطلبات الطاقة المتراكِمة (AEE)	kW·h
KEV	استهلاك الطاقة المتراكِمة (AEC)	kW·h
KOH	محلول بوتاس الكاوية	
l	لتر (1 لتر = 1 ديسيمتر مكعب) ($1\ l = 1\ dm^3$)	
l_{ch}	الطول المميِّز	m
L	طول المنظومة	
LCA	تحليل دورة الحياة	
(poly-Si) mc-Si	سليكون متعدد البلورة (multi- or poly-crystalline Si)	
MG-Si	السليكون ذو الدرجة الفلزية	
MP	القدرة القصوى	
MPP	نقطة القدرة القصوى	
MPPT	تعقُّب نقطة القدرة القصوى	
(sc-Si) m-Si	سليكون أحادي البلورة (mono- or single-crystalline Si)	
MWS	منشار الملاط المتعدد الأسلاك (تقنية لنشر الرقاقات)	
n	معامل الانكسار	
$\hat{n}_i$	معامل الانكسار المركَّب للطبقة i	
n_1	معامل الانكسار البصري للوسط الأصلي	
n_2	معامل الانكسار البصري لوسط الدخول	
N	عدد أيام السنة	
NEC	الاستهلاك غير الطاقي	
NOC	ظروف التشغيل الاسمية ($E = 800\ W/m^2$، $w = 1\ m/s$، □ أو NOCT)	
NOCT	درجة حرارة التشغيل الاسمية للخلية	°C
Nu	عدد نوسيلت	
OC	الدائرة المفتوحة	
p	ضغط الهواء	$N{\cdot}m^{-2}$
p_0	الضغط الاسمي ($1.013\times10^6\ N{\cdot}K^{-2}$)	$N{\cdot}m^{-2}$
P	القدرة، التدفق الحراري	W
P_{el}	القدرة الكهربائية	W
P_{in}	القدرة الإشعاعية في الخلية	W

P_{mp}	قدرة الخلية الشمسية للتهيئة المثلى للحِمل	W
P_n	القدرة الاسمية (قدرة نوع اللوح عند ظروف الفحص المعيارية)	W_p
Pr	عدد براندتل	
PC	متعدد الكربونات	
PE	البوليثيلين	
PMMA	الزجاج الأكريليكي (Plexiglas)	
PTFE	الإثيلين متعدد الفلور الثلاثي (التيفلون Teflon)	
PP	البوليبروبيلين	
PV	الفولتضوئية	
PVC	الكلوريد متعدد الفينيل	
PVF	الفلوريد متعدد الفينيل	
q	شحنة الإلكترون (1.6022×10^{-19} A·s)	C
Q	كمية الحرارة	W·s
$\dot{Q}$	التدفق الحراري	W
$\dot{Q}_{fc}$	التدفق الحراري بالحمل الحراري القسري	W
$\dot{Q}_{nc}$	التدفق الحراري بالحمل الحراري الطبيعي	W
$\dot{Q}_{rad}$	التدفق الحراري بالإشعاع	W
$\dot{Q}_F$	التدفق الحراري خلال الجانب الأمامي للمنظومة	W
$\dot{Q}_B$	التدفق الحراري خلال الجانب الخلفي للمنظومة	W
r	معامل الانعكاس	
$r_{\parallel}$	معامل الانعكاس للإشعاعية المستقطبة المتوازية	
$r_{\perp}$	معامل الانعكاس للإشعاعية المستقطبة العمودية	
R	المقاومة الكهربائية	Ω
R	الانعكاسية	
R_0	الانعكاسية للأشعة الساقطة عمودياً	
R_{xy}	الانعكاسية للحد الفاصل بين المادة x والمادة y	
$R_{\parallel}$	الانعكاسية للإشعاعية المستقطبة المتوازية	
$R_{\perp}$	الانعكاسية للإشعاعية المستقطبة العمودية	

Ra	عدد رايلي ($Ra = Gr.Pr$)	
RC	الظروف الحقيقية/المُبلَّغ بها	
Re	عدد رينولدز	
SG-Si	السليكون ذو الدرجة الشمسية	
SC	دائرة قِصَر	
Si	سليكون	
STC	ظروف الفحص المعيارية (□ = 25 °C، $E = 1000\ W/m^2$، AM 1.5، سقوط عمودي)	
SRC	الظروف الحقيقية/المُبلَّغ بها المعيارية	
t	التوقيت اليومي	h
T	النفاذية	
T_{xy}	النفاذية للحد الفاصل بين المادة x والمادة y	
$T_{\parallel}$	النفاذية للإشعاعية المستقطبة المتوازية	
$T_{\perp}$	النفاذية للإشعاعية المستقطبة العمودية	
T	درجة الحرارة	K
T_A	درجة حرارة الوسط المحيط	K
T_C	درجة حرارة الخلية	K
T_F	درجة حرارة سطح الجانب الأمامي للمنظومة	K
T_g	درجة حرارة "الزجاج" للبوليمرات	K
T_H	درجة حرارة السماء	K
T_{Hl}	درجة حرارة شبه الموصل (مكافئ لـ T_C)	K
T_i	درجة حرارة الطبقة i	K
T_M	درجة حرارة سطح المنظومة (بشكل عام)	K
T_B	درجة حرارة سطح الجانب الخلفي للمنظومة	K
T_s	درجة حرارة إشعاع الجسم الأسود	K
T_S	درجة حرارة الانصهار (نقطة الانصهار)	K
T_C	معامل درجة الحرارة (قيمة معيارية)	K^{-1}
TiO_2	أكسيد التيتانيوم (يُستخدم كطلية مضادة للانعكاس)	
u	الجهد المعايَر (normalized) ($u = Uq(kT)^{-1}$)	

U_D	جهد حالة التوصيل (جهد أمامي) (عند $I_D = 0.1\ I_{max}$)	V
U_{mp}	الجهد عند النقطة المُخرجَة القصوى للقدرة	V
U_{oc}	جهد الدائرة المفتوحة	V
u_{oc}	جهد الدائرة المفتوحة المعايَر	
$U_{oc,25°C}$	جهد الدائرة المفتوحة عند درجة حرارة الخلية 25 °C	V
U_{string}	جهد السلسلة (الخلايا المتصلة على التوالي)	V
U_{V1}	الفقد في الجهد بالتظليل الجزئي	V
U_{V2}	الفقد في الجهد بواسطة التيار العكسي لدايود الصد	V
V	درجة الاستقطاب	
w	سرعة الرياح	$m \cdot s^{-1}$
W_p	قدرة خرج الفولتضوئية بالوات (Watt) تحت ظروف STC	
WR	العاكس الكهربائي الذي يحوّل التيار المباشر إلى تيار متردد	
W	الطاقة (الأساسية)	J
ZnO	أكسيد الزنك (يُستخدم كطلية مضادة للانعكاس)	
ZnS	كبريتات الزنك (تُستخدم كطلية مضادة للانعكاس)	
ZrO_2	ثاني أكسيد الزركون (يُستخدم كطلية مضادة للانعكاس)	
α	معامل الامتصاص	m^{-1}
α	معامل الانتقال الحراري (المعيار الأوروبي)	$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$
α_{fc}	معامل الانتقال الحراري، الحمل الحراري القسري	$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$
α_{nc}	معامل الانتقال الحراري، الحمل الحراري الطبيعي	$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$
α_{Fconv}	معامل الانتقال الحراري الحملي (fc+nc) للجانب الأمامي للمنظومة	$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$
α_{Bconv}	معامل الانتقال الحراري الحملي (fc+nc) للجانب الخلفي للمنظومة	$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$
α	زاوية السمت (الانحراف من الشمال)	°
α_M	الاتجاه السمتي للمنظومة (الجانب الأمامي)	°
α_P	زاوية السمت للنقطة P الواقعة في الكرة السماوية	°
α_S	زاوية السمت للشمس	°
β	معامل التمدد الحراري الحجمي	K^{-1}
γ_M	زاوية ارتفاع المنظومة	°

γ_S	زاوية الارتفاع للشمس	°
$\Delta\gamma_S$	زاوية الارتفاع الإضافية للشمس (الناتجة من انكسار الغلاف الجوي)	°
δ_S	الزاوية التي تغطي نصف قطر الشمس ("زاوية الشمس = 0.54°")	°
ε	الانبعاثية الحرارية لسطح (في الأشعة تحت الحمراء)	
ε_λ	الانبعاثية الحرارية عند الطول الموجي λ	
$_0$	ثابت السماحية للفراغ ($_0 = 8.85\times10^{-12}\ F\cdot m^{-1}$)	$F\cdot m^{-1}$
	ثابت العازل ($=\ _1 - i\ _2$)	$F\cdot m^{-1}$
η	الكفاءة	
η_{PV}	كفاءة التحويل الفولتضوئي	
η_{DZ}	اللزوجة الديناميكية للمائع	$N\cdot s\cdot m^{-2}$
θ_{in}	زاوية السقوط (بالنسبة إلى العمودي على السطح)	°
θ_{out}	زاوية الانكسار	°
θ_i	زاوية السقوط للطبقة i	°
θ_p	زاوية بريوستر (Brewster) (أو زاوية الاستقطاب)	°
$_A$	درجة حرارة الوسط المحيط	°C
$_A(t)$	مسار درجة حرارة الوسط المحيط مع الزمن	°C
$_A$	درجة الحرارة القصوى للوسط المحيط	°C
$_A$	متوسط درجة حرارة الوسط المحيط	°C
$_C$	درجة حرارة الخلية	°C
λ	الطول الموجي للأشعة	m
λ	الموصلية الحرارية	$W\cdot K^{-1}\cdot m^{-1}$
ρ	الكثافة	$kg\cdot m^{-3}$
ρ_L	كثافة الهواء	$kg\cdot m^{-3}$
ρ_0	الكثافة عند مستوى سطح البحر	$kg\cdot m^{-3}$
ρ	الانعكاسية	
ρ_i	الانعكاسية للطبقة i	
$\overline{\rho}_i$	الانعكاسية الداخلية للطبقة i	
ρ_{nm}	الانعكاسية للنظام المكون من طبقتين n و m	

ρ_i	الانعكاسية لكامل الشريحة i	
ρ_{ijk}	الانعكاسية للنظام البصري المكون من ثلاث شرائح i و j و k	
$\overline{\rho}_{ik}$	الانعكاسية الداخلية للنظام البصري المكون من شريحتين i و k	
ρ_{12}	عامل الرؤية	
σ	ثابت ستيفان–بولتزمان (5.670×10^{-8} $W\cdot m^{-2}\cdot K^{-4}$)	$W\cdot m^{-2}\cdot K^{-4}$
τ	النفاذية	
τ_i	النفاذية للطبقة i	
τ_{123}	النفاذية للنظام البصري المكون من ثلاث طبقات 1 و 2 و 3	
$\overline{\tau}_i$	النفاذية الداخلية للطبقة i	
$\tau_{ij,1}$	النفاذية للشعاع الأول للنظام البصري المكون من شريحتين i و j	
τ_{ijk}	النفاذية للنظام البصري المكون من ثلاث شرائح i و j و k	
$\overline{\tau}_{ik}$	النفاذية الداخلية للنظام البصري المكون من شريحتين i و k	
	متوسط القيمة	
$\parallel$	متجه المجال الكهربي الموازي لمستوى السقوط	
$\perp$	متجه المجال الكهربي العمودي على مستوى السقوط	
[x]	تعني "وحدة قياس x". على العكس من ذلك، في معادلات التقريب التي تكون فيها فقط القيم العددية للمتغير x هي المطلوبة، يتم الإشارة إلى ذلك بالعبارة "x مقاسة بوحدات y" في الشرح.	

12-2الجداول

الجدول (أ-1): تحويل وحدات قياس الطاقة المختلفة

وحدة الطاقة	التحويل Btu	J (=W	kW	cal	t SKE (طن من الفحم المكافئ)	TOE (طن من النفط المكافئ)
Btu 1 =	1	1.055	10^3×0,2930	252	10^9×35,9	10^9×25,13
J 1 =	10^3×9,481	1	10^9×277,8	2388	10^{12}×34,1	10^{12}×23,87
kW 1 =	3413	10^6×3,600	1	10^5×8,601	10^4×1,228	10^4×8,596
cal 1 =	10^3×3,968	4,186	106×1,163	1	10^9×0,1429	10^9×0,100
t SKE 1 =	10^6×27,78	10^9×29,31	8141	10^9×7,00	1	0,7
TOE 1 =	10^6×39,69	10^9×41,87	11630	10^9×10,0	1,4286	1

تحويل الوحدات الكبرى للطاقة في النظام الدولي للوحدات (SI):

1 EJ = 1,000 PJ = 1,000,000 TJ = 1,000,000,000 GJ = 109 GJ = 1012 MJ = 1015 kJ = 1018 J

تدفق الطاقة:

1 W/m2 = 0.317 Btu/(h1 langley (ly) = 1 cal/cm2 = 3.687 Btu/ft2

الجدول (أ-2): القيمة الحرارية وشدة ثاني أكسيد الكربون للوقود الإحفوري

نوع الوقود	الكثافة (kg/m3)	القيمة الحرارية (MJ/kg)	المرجع	CO2 (kg/MJ)	المرجع
القش		16	كليمان (Kleemann) 1993		
ورق القمامة	1200-700	17	كليمان 1993		
قصب السكر		15	كليمان 1993		
الخشب (عام)	800-400	13,3	(Gieck) 2005		
		14,65	BMWi 1996		
خشب الدردار	750	18,6	كليمان 1993		
خشب الزان	720	18,8	كليمان 1993		
خشب السنديان	850	18,3	كليمان 1993		
خشب الصنوبر	620-480	19.0	كليمان 1993		
الخث (peat)	190	12.0	ميندي (Mende) 1981		
وقود الخث	500	14,24	BMWi 1996		
الليغنيت	1400-1200	9,60	(Gieck) 2005	0,111	كولب (Kolb) 1989
		848	BMWi 1996	0,111	(Lewin) 1993

طـــــــوب الليجنيت	1250	20	(Mende, 1981		
		19,47	BMWi 1996		
كوك الليغنيت	1500–1200	29,936	BMWi 1996		
الفحم الحجري	1350	29,761	BMWi 1996	0,0917	(Lewin) 1993
كوك الأفران	1400–1100	30,1	(Gieck) 2005	0,0751	(Faber) 1996
فـــحـــــم الأنثراسيت	1500–1300	33,4	(Gieck) 2005		
نـفـط مـعـدني خام	940–730	42,8	BMWi 1996		
ديزل	830	42,1	جيك (Gieck) 2005	0,0777	(Kolb) 1989
نـفـط خـفـيـف جداً	860	41,843	جيك (Gieck) 2005	كليمان 1993	0,0621
(Faber) 1996	نفط خفيف	1100	42,73	BMWi 1996	0,0777
(Lewin) 1993	نفط ثقيل	1200 <	40,61	BMWi 1996	0,0833
(Lewin) 1993	بترول	810	42,00	مـــــــــيندي Mende) 1981)	
			43,00	BMWi 1996	
كيروسين	720	43,54	BMWi 1996		
غازولين	780	42,50	(Gieck) 2005		
إيثانول	789	26,90	(Gieck) 1989		
ميثانول	792	20,00	(Mende) 1981		
غـاز طـبـيـعـي سائل		45,99	BMWi 1996		
غـاز نـفـطـي معدني		MJ/m3 40,3	BMWi 1996		
غاز طبيعي		MJ/m3 31,74	BMWi 1996	0,0528	(Lewin) 1993
غاز المدينة	0,580	MJ/m3 15,99	BMWi 1996	0,0461	(Faber) 1996
بيوتان	2,680	MJ/m3 124	ميندي (Mende) 1981		
بروبان	2,010	MJ/m3 94	ميندي (Mende) 1981		
ميثان	0,720	MJ/m3 36	(Mende) 1981		
غاز المجاري		MJ/m3 16	BMWi 1996		
أول أكـســيـد الكربون	1,250	MJ/m3 13	(Mende) 1981		
الهيدروجين	0,090	119,9	(Gieck) 2005		
الـكـهـربـاء (ألمانيا):	موازنة الطاقة الأساسية	9,37 KWh	BMWi 1996 MJ/	0,53 (مـزيـج قـدرة ألمانـيا العام)	

استهلاك الطاقة النهائي	3,60 MJ/ KWh	BMWi 1996
1 kg كربون	kg CO2 3,87	(Shell) 1997

الجدول (أ-3): انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لتوليد 1 kWh من الطاقة الكهربائية

نوع الوقود	الوقود (kg/kWh)	نقل وتجهيز (kg/kWh)	بناء محطة القدرة 1 (kg/kWh)	مجموع CO2 (kg/kWh)	مجموع CO2 المكافئ (kg/kWh)	المرجع
ليغنيت					1,244	(Lewin) 1993b
				1,1356	1,1466	قاعدة بيانات 1995
	0,99					Kaltscmidt 1995b
فحم حجري					1,206	(Lewin)1993b
	0,781	0,0495	−0,0044	−0,834		ستيلزر 1994
			0,0072	0,835		
	0,781			−0,834		Kaltscmidt 1995
				0,917		
				0,9177	1,0499	قاعدة بيانات 1995
	0,781	0,0001		0,844	0,9384	Kaltscmidt 1997
غاز طبيعي	0,365			−0,373		Kaltscmidt 1995
				0,416		
	0,361	0,006		0,4235	0,4501	1997 Kaltscmidt
غاز مؤلف				0,4076	0,4387	قاعدة بيانات 1995
					0,453	(Lewin) 1993b
ديزل توليد مشترك				0,3265	0,3407	قاعدة بيانات 1995
رياح عام	0				0,011	(Lewin) 1996b
قدرة رياح 4.5 m/s	0			0,0163		Stelzer 1994
	0			−0,021	−0,024	Kaltschmitt 1997
				0,036	0,040	
قدرة رياح m/s 5,5	0			0,0108		Stelzer 1994
	0		−0,013	−0,013		Kaltschmitt 1995
			0,022	0,022		
	0			−0,015	−0,016	Kaltschmitt 1997
				0,023	0,025	

	0			0,046−0,042	Kaltschmitt 2003
قدرة رياح 6,5 m/s	0		0,0108		Stelzer 1994
	0		0,018−0,011	0,020−0,012	Kaltschmitt 1997
	0			−0,0295 0,0339	Kaltschmitt 2003
قدرة رياح 7,5 m/s	0			−0,0226 0,0257	Kaltschmitt 2003
القدرة المائية	0		0,0072		Stelzer 1994
	0	−0,0070 0,0200	0,0200−0,0070		Kaltschmitt 1995
قدرة مائية صغيرة	0		0,015−0,014	0,017−0,015	Kaltschmitt 1997
	0			−0,0165 0,0211	Kaltschmitt 2003
قدرة مائية كبيرة	0		0,010−0,006	0,011−0,007	Kaltschmitt 1997
	0			−0,0100 0,0164	Kaltschmitt 2003
فولتضوئية (عام)	0	0,260−0,170	0,260−0,170		Kaltschmitt 1995 (وسط أوروبا)
	0			0,228	Lewin 1993b
فولتضوئية (sc-Si)	0		0,250−0,150		Hagedorn 1990
	0		0,0994		Wagner [et. al,], 1993
	0		0,318−0,206		VoB 1993
	0		0,318−0,247		Brauch 1997
	0		0,188	0,202−0,200	Kaltschmitt 1997
	0			0,279−0,238	Kaltschmitt 2003
	0			0,041	ألسيما 2005
فولتضوئية (mc-Si)	0		0,250−0,110		Hagedorn 1990

	0		−0,232 0,298		Stelzer 1994
					Brouch 1997
	0		−0,100 0,170	−0,115 0,185	Staips 1995
	0		−0,316 0,318	−0,336 0,339	Kaltschmitt 2003
	0			−0,199 0,235	Kaltschmitt 1997
				0,031	ألسيما 2005
فولتضوئية (rib-Si)				0,026	ألسيما 2005
فولتضوئية (a-Si)	0		−0,100 0,170		Hagedorn 1990
	0		−0,206 0,265		براوخ 1997
	0		−0,141 0,163	−0,150 0,176	Kaltschmitt 1997
	0			−0,123 0,130	Kaltschmitt 2003
فولتضوئية (CdTe)	0		0,0517		جيميس (Gemis)) 1992
	0	517	0,0517	0,0612	قاعدة بيانات 1995
فولتضوئية (CIS)	0		0,015		زيتل (Zittel) 1992
فولتضوئية (CdTe, CIS)	0		0,03	0,0325	ستيس 1995
جميع محطات القدرة في ألمانيا			0,530	Bloss [et al.]) 1992	

- في الصنف «نقل وتجهيز»، أعمال عمال المنجم تم تضمينها للفحم الحجري، وخطوط الأنابيب تم تضمينها للغاز الطبيعي.

- سرعات الرياح مرتبطة بالمتوسطات السنوية وتقاس 50 متراً فوق مستوى الأرض بالنسبة إلى Kaltschmitt 2003 2003 وعند 10 أمتار فوق مستوى الأرض بالنسبة إلى المراجع الأخرى.

- الفولتضوئية لKaltschmitt 1995, 2003 معطاة لظروف وسط أوروبا.

- لحساب CO_2 المكافئ، يتم تحويل الكميات المنبعثة من CH_4 و N_2O إلى مقاديرها المولارية

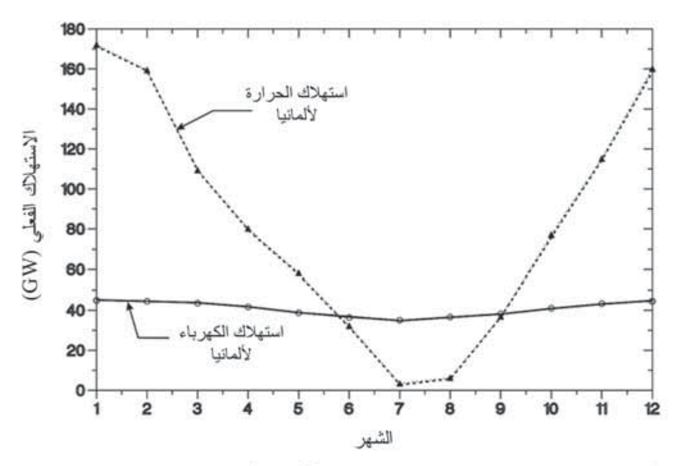
لتأثير الدفيئة وفقاً للجدول (أ-2) (حيث إن أوزانها المولارية هي: C = 12 g/mol، H = 1 g/mol، N = 14 g/mol، O = 16 g/mol، F = 19 g/mol؛ و CO2 = 44 g/mol، CO = 28 g/mol، O3 = 48 g/mol، CH4 = 16 g/mol، N2O = 44 g/mol). وحسابات ستيس 1995 للسليكون المتعدد البلورة (mc-Si) هي: CH4 = 0.000432 kg/kWh، N2O = 0.0000072 kg/kWh؛ ولكل من CdTe و CIS هي: CH4 = 0.000072 kg/kWh، N2O = 0.0000012 kg/kWh.

الجدول (أ-4): شدة الطاقة في قطاعات اقتصادية مختلفة: متطلب الطاقة لكل قيمة مالية متولدة

(المراجع: Spring (Spreng) 1995، وشولز وآخرون (Schulze [et al.]) 1992)	نوع القطاع الاقتصادي
€/MJ	طاقة أساسية
المنتجات، والمواد، والمكونات:	
الزراعة	189,8
الغابات، والأسماك	42,3
المياه	21,3
التعدين (من دون الفحم الحجري، والنفط، والغاز الطبيعي)	31,5
الكيميائي	33,1
البلاستيك	16,6
المطاط	13,7
مواد البناء، الحجارة	23,5
السيراميك الفاخر	19
الزجاج والمنتجات الزجاجية	25,6
الحديد والفولاذ (من دون غاز الفرن العالي)	56,3
معادن غير حديدية	45,6
منتجات سبك المعادن	20,5
صناعة ومعامل الدلفنة	22,1
إنتاج الفولاذ والسبائك الخفيفة	13,1
الهندسة الميكانيكية	9,6
معدات وأدوات مكتبية	10,6
صناعة السيارات	11,9
صناعة السفن البحرية	13,3
صناعة الطائرات والسفن الفضائية	7,2
الهندسة الكهربائية	9,4

(المراجع: Spring (Spreng) 1995، وشولز وآخرون (Schulze [et al.]) 1992)	نوع القطاع الاقتصادي
€/MJ	طاقة أساسية
الميكانيكا الدقيقة، البصريات	8,2
صناعة ومعالجة الحديد، والصفائح، والمعادن	15,5
الأدوات الرياضية، والموسيقية، وألعاب الدمى، والمجوهرات	10,8
الخشب	20,5
المنتجات الخشبية	10,1
السليلوز، وعجينة الورق، والورق، والكرتون	40,9
المنتجات الورقية والكرتونية	19,2
الطباعة والنسخ	13,9
الجلود، والمنتجات الجلدية	9,8
المنسوجات	17
الملابس	9
المنتجات الغذائية (من دون المشروبات)	16,4
المشروبات	12,3
منتجات التبغ	2,7
الهندسة المدنية	11,1
إكمال	8,4
الخدمات:	
تجارة الجملة	4,9
تجارة التجزئة	7,6
السكك الحديدية	32,2
الموانئ والسكك البحرية	29,5

(المراجع : Spring (Spreng) 1995، وشولز وآخرون (Schulze [et al.]) 1992) € /MJ	نوع القطاع الاقتصادي طاقة أساسية
البريد والاتصالات	5,9
وسائل النقل الأخرى	13,7
البنكية	19,8
التأمينات	4,3
تأجير المباني، المساكن	6,5
صناعة الفنادق والمطاعم	10,2
العلوم، والآداب، والنشر	9,2
الصحي والطب البيطري	5,5
خدمات أخرى	4,9
السلطات المحلية	7,2
الأمن الاجتماعي	8
خدمات من دون مكافآت (التدبير المنزلي... إلخ)	5,9



الشكل (أ-1): منحنى استهلاك القدرة الموسمي لغرب ألمانيا: أحمال الكهرباء والحرارة خلال سنة نموذجية (المرجع: هينلوث (Heinloth) 1996).

الجدول (أ-5): متطلبات الطاقة لإنتاج مواد مختلفة

المادة المنتَجة	متطلب الطاقة الأساسية (MJ/kg)	المرجع	انبعاثات CO2 (kg/kg)	CO2 المكافئ (kg/kg)	المرجع
فولاذ	24,0	Spring 1995	2,047		Lwein, 1993 a,b
	30,0	Kaltschmitt 1995	3,00		Kaltschmitt1995
	20,0 (1	Kaltschmitt 1997	1,69 (1	1,85 (1	Kaltschmitt 1997
فولاذ (40 في المئة معاد تدويره)	23,65	Kaltschmitt 2003		1,91	Kaltschmitt 2003
فولاذ أكسجين (أساسي)	16-27	هوتّي (Hütte) 2004			
صفائح فولاذ	25,20	قاعدة بيانات 1995			
فولاذ كهربي (ثانوي)	10-18	هوتّي 2004			
نحاس	9,50	Kaltschmitt 1995	8,800		Kaltschmitt 1995
		فريتشي (Fritsche) 1989	4,901		ليوين a,b1993
	98,0	ماوخ (Mauch) 1995	7,30		ماوخ 1995
	88,6 (2	Kaltschmitt 1997	5,08 (2	5,36 (2	Kaltschmitt 1997
نحاس (معدل إعادة تدوير 56 في المئة)	37,08	Kaltschmitt 2003		2,80	Kaltschmitt 2003
أنابيب نحاسية	49,0	Wagner 1995a			
ألمنيوم	250	Kaltschmitt 1995	25,00		Kaltschmitt 1995
	250	Spring 1995	12,968		ليوين a,b1993
	245	ماوخ 1995	15,10		ماوخ 1995
ألمنيوم أساسي (قائم على البوكسايت)	160-240	هوتّي 2004		23,1	(Lenzen) 1998
	250	(Lenzen) 1998			
صفيح ألمنيوم	260,20	Wagner 1995			
	252,00	قاعدة بيانات 1995			

ألمنيوم (63 في المئة معاد تدويره)	113,9 3)	Kaltschmitt 1997	6,70 3)	7,03 3)	Kaltschmitt 1997
	107,94	Kaltschmitt 2003		7,57	Kaltschmitt 2003
ألمنيوم ثانوي (من الخردة)	12–20	هوتّ 2004			
رصاص (من الخام)	51,0	لينزن 1998		4,70	لينزن 1998
خرسانة	0,490	Kaltschmitt 2003	0,285	0,130	ليوين 1993
Kaltschmitt 2003	خرسانة ((PZ	0,210	(Hantsche) 1993	0,144	هانتشي 1993
	1,415				
خرسانة ((HOZ	0,210	هانتشي 1993	0,0344		هانتشي 1993
	0,574				
إسمنت	4,0	Kaltschmitt 1995	0,94	0,96	Kaltschmitt 1995
	3,6	قاعدة بيانات 1995	0,855		ليوين a,b1993
	4,4	ماوخ 1995	0,40		ماوخ 1995
	1,18	Kaltschmitt 1997	0,94	0,96	Kaltschmitt 1997
إسمنت بورتلاند	0,106	هانتشي 1993	0,994	0,994	هانتشي 1993
	7,930				
إسمنت (فرن عالي)	0,106	هانتشي 1993	0,205		هانتشي 1993
	2,100				
زجاج	20,0	Kaltschmitt 1995	1,90		Kaltschmitt 1995
	10,0	Spring 1995	0,49		مستشارو بيئة الإنتاج ((PEC 1996
زجاج عائم	14,0	Wagner 1995b	0,935		ليوين a,b1993
	8,2	Hagedorn 1996	0,59		Hagedorn 1996
	6,98	هانتشي 1993	0,539		هانتشي 1993
	14,80				
زجاج عائم (تسخين إضافي كهربائي)	5,23	هانتشي 1993	0,741		هانتشي 1993
	14,00				
قوارير زجاجية (جديدة)	10,8	قاعدة بيانات 1995			قاعدة بيانات 1995

قوارير زجاجية (50 في المئة معاد تدويرها)	7,2	قاعدة بيانات 1995			قاعدة بيانات 1995
ورق (مبيَّض)	79,2	قاعدة بيانات 1995			قاعدة بيانات 1995
ورق (100 في المئة معاد تدويره)	18,0	قاعدة بيانات 1995			قاعدة بيانات 1995
بوليستيرين موسَّع ((EPS	82,0	Spring˜¿¿ç			Spring˜¿¿ç
	75,3	Wagner˜¿¿ça			
	75,0	هوتّ 2004			
متعدد اليوريثين PU)) (polyurethane)	90,7	Wagner˜¿¿ça			
	95,0	Spring˜¿¿ç			Spring˜¿¿ç
	190,0	لينزن 1998		15,6	لينزن 1998
بوليثيلين (عالي ومنخفض الكثافة)	80,0	1995 Spring			
	73,0	Wagner a1995			
	68,0	هوتّ 2004		1,79	PEC 1996
PVC	48,0	هوتّ 2004			
PVC (من النفط الخام)	74,0	لينزن 1998	7,60		لينزن 1998
البلاستيك (بشكل عام)	65,0	Kaltschmitt 1995	6,00		Kaltschmitt 1995
	72,0	قاعدة بيانات 1995	1,964		ليوين a,b1993

(1 40 في المئة مكونات معاد تدويرها، و 80 في المئة فولاذ أكسجين، و 20 في المئة فولاذ كهربي.

(2 40 في المئة مكونات معاد تدويرها.

(3 50 في المئة مكونات معاد تدويرها.

الجدول (أ-6): الإعانات المالية لتعدين الفحم الحجري في ألمانيا (المراجع: Stromthemen 4/97، VDEW)

السنة	1997	1998	2005
الإعانات بالبليون يورو (€)	4,54	4,72	2,81
عدد الأعمال	84،000		36،000
الإعانة لكل سنة لكل عمل باليورو (€)	54،048		77،947
الإعانة لكل kWh متولدة باليورو (€)	0,051		0,063

تكلفة الفحم الحجري الألماني: t /€ 183,67، والإعانة المالية: t /€ 142,86 (التعديل إلى السعر في السوق العالمي t /€ 40,82)، والطاقة الحرارية للفحم الحجري: 8،287 = kWh/t 29,761 MJ/t، وتوليد الطاقة الكهربائية: 2،756 kWh/t (الكفاءة للكهرباء المتولدة: 0,33).

الجدول (أ-7): مكونات توليد الطاقة الكهربائية في ألمانيا عام 2004 المراجع: الجمعية

الألمانية للكهرباء (VDEW) 2005)، والمعهد الألماني لطاقة الرياح (DEWI) 2005) نوع الطاقة (بليون kWh)	نسبة الإسهام	صافي التوليد (في المئة)
القدرة النووية	158,4	27,8
فحم الليغنيت	146,0	25,6
الفحم الحجري	127,1	22,3
الغاز الطبيعي	59,2	10,4
الوقود السائلة (ديزل وأخرى)	9,2	1,6
القدرة المائية	20,0	3,7
قدرة الرياح	25,0	4,4
الفولتضوئية	0,5	0,1
النفايات	2,1	0,4
الكتلة الحيوية	5,2	0,9
أخرى	16,5	2,9
المجموع	570,1	100

إجمالي السعة التي تم تنصيبها في ألمانيا في عام 2004: فولتضوئية: 708 MWp، ورياح: 16،629 MWp.

تشير البيانات الحديثة (BMU، شباط/ فبراير 2006) إلى أنه في عام 2005، ساهمت الطاقات المتجددة بنسبة 10,2 في المئة للاستهلاك الكهربائي الألماني (الرياح: 4,3 في المئة، والمائية: 3,5 في المئة، والفولتضوئية: 0,2 في المئة، والكتلة الحيوية والنفايات: 2,2 في المئة)، وانخفضت انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 83 مليون طن متري.

الجدول (أ-8): متطلبات الطاقة وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون لنقل البضاعة

نوع النقل	الطاقة المباشرة MJ/t)	CO_2 المباشر (kg/t)	الطاقة المباشرة وغير المباشرة (MJ/t)	مجموع CO_2 (kg/t)	نوع الوقود	المراجع لبيانات الطاقة (1996 مع CO_2
شاحنة حاويات (عبر البحار) 47،000 t،	43 km/h	0,09	0,0075	0,12	0,0094	100 في المئة HO
						Frischknecht) 1994
	0,029	0,00692	0,12	0,0086	100 في المئة HO	1996 Frischknecht
شاحنة (ملاحة داخلية)	0,48	0,04	0,84	0,063	100 في المئة D	1994 Frischknecht
	0,51	0,0365	0,844	0,05863	100 في المئة D	1996 Frischknecht
سكة حديد	0,48	0,556	1,39	0,1137	51 في المئة E (1 49 في المئة D	1994 Frischknecht
	0,319	0,104	0,956	0,0513	80 في المئة E 20 في المئة D	1996 Frischknecht
	0,9			0,08		لينزن 1998
شاحنة (40 t 50 في المئة حِمل	1,16	0,0967	2,16	0,1606	100 في المئة D	1994 Frischknecht
	1,00	0,079	2,08	0,13637	100 في المئة D	1996 Frischknecht
شاحنة (28 t 40 في المئة حِمل	1,87	0,156	3,15	0,2378	100 في المئة D	1994 Frischknecht
	1,80	0,14	3,14	0,20716	100 في المئة D	1996 Frischknecht
شاحنة (16 t 40 في المئة حِمل	2,78	0,232	4,62	0,3496	100 في المئة D	1994 Frischknecht
	3,40	0,259	5,20	0,3458	100 في المئة D	1996 Frischknecht

حافلة تسليم (أقل من 3,5 30 t) في المئة حِمل	6,03	0,503	9,99	0,756	30 في المئة Gu 50 في المئة Gl	20 في المئة D Frischknecht 1994
	14,1	1,03	24,40	1,5438	33 في المئة Gu 38 في المئة Gl	29 في المئة D Frischknecht 1996
سيارة (2 بمتوسط 1,4 راكب = 140 kg 20 في المئة D	27,9	2,325	47,60	35,836	60 في المئة Gl	20 في المئة Gu Frischknecht 1994
	22,86	1,479	34,00	22,086	60 في المئة G	20 في المئة Gc
20 في المئة D	Frischknecht 1996	طيران (شحن جوي، مسافة بعيدة)	10,7	0,772	15,67	حوالى (3 2,3
100 في المئة K	لوفتهانزا 1996		13,8	حوالى 1,07		
	هينلوث 1996 لينزن 1998		65,1			5,40

(1 مناورة شاملة.

(2 لغرب أوروبا، بيانات فريشكنيخت 1994 لـ 100 kg / 1.4 راكب.

(3 تقدير ذاتي (مادة الطائرة هي 100 في المئة ألمنيوم).

لقد استُخدِمت خصائص ثاني أكسيد الكربون الآتية للبيانات التي تم الحصول عليها من فريشكنيخت 1994:

الكهرباء: 0,53 kg CO2/kWh (ألمانيا)، والوقود: 0,3 kg CO2/kWh، واستهلاك الوقود غير الطاقي (طاقة غير مباشرة): 0,23 kg CO2/kWh (Wagner, 1996).

للشاحنة اللوري 18 طن ذات مفاصل (40 طن مع المقطورة)، يقترح ماوخ 1993 استهلاك طاقة متراكِمة للإنتاج (AECp) قدره 399,3 GJ خلال عمرها الزمني البالغ 600،000 km، والاستهلاك هو 14،400 GJ من وقود الديزل و 497 GJ من وسائط التشغيل (نفط، ومطاط، وفولاذ) (AEEo).

= G غازولين

= Gl غازولين به رصاص
= Gu غازولين منزوع الرصاص
= Gc غازولين بعامل حفاز
= K كيروسين
= D وقود الديزل
= HO نفط ثقيل
= E تعمل بالكهرباء

الجدول (أ–9أ): انحراف الشمال المغنطيسي إلى الشمال الحقيقي

الموقع (خط الطول، خط العرض)	الانحراف المغناطيسي عن الشمال الحقيقي	التغير السنوي للانحراف
برلين (13 E22 '، 52º30' N)	+1 38'	+6,5' في السنة
هراري (31 E1 '، 17º42' S)	7 52'	+1,5' في السنة
لوس أنجلوس (118 W14 '، 34º4' N)	+13 38'	1,8' في السنة
ماناجوا (86 W20 '، 12º5' N)	+1 10'	8,3' في السنة
ريو دي جانييرو (43 W12 '، 22º54' S)	+21 17'	6,2' في السنة
بكين (116 E20 '، 39º54' N)	5 53'	1,2' في السنة
سدني (151 E12 '، 33º52' S)	+18 45'	+3,1' في السنة

الاتجاه الزاوي الحقيقي = الاتجاه الزاوي المغنطيسي + الانحراف المغنطيسي. هذه البيانات تستند إلى بيانات «المجال المرجعي الجيومغنطيسي الدولي» (IGRF) 2000 لشهر حزيران/ يونيو 2001، المقدمة من قِبَل «الجمعية الدولية لعلوم الأرض والأجواء» (IAGA) (International Association of Geo-sciences and Aeronomy)، القسم V، مجموعة العمل رقم 81. المرجع: كامبيل (Campbell) 1997.

الجدول (أ–9ب): متطلبات المادة لمحطات القدرة الفولتضوئية

المادة	الاستهلاك المحدد من المادة (t/MWp) (ستيس 1995)		الاستهلاك المحدد من المادة (t/MWp) (ليوين 1993)		
	Si	CIS	Sc-Si	mc-Si	a-Si
خرسانة	1193	1193	987,9	1192,9	1919,8
فولاذ	270,5	270,5	210,1	285,3	410,1
نحاس	38,6	0,0435	13,6	16,3	26,1
ألمنيوم		0,054	10,1	0,1	0,1
مطاط/ بلاستيك	7,8	7,8	10,1	11,1	9,4
SiO2 (حصى كوارتزية)		361,3			

خشب	186,9	
زجاج	101,4	
فحم حجري	74,7	
فحم كوك بترولي	49,8	
HCl (100%)	485,5	
SiC	11,3	
H2	16,7	
N2	930,1	
O2	38,7	
أرجون		16,2
مولوبيدنوم		0,2
إنديوم		0,0785
سيلينيوم		0,325

الجدول (أ-10): معاملات الانكسار البصرية (n) لأطوال موجية (ë) مختلفة و T = 20-25 Cº

المادة	ح((nm	n	المرجع
زجاج ((Optiwhite	400	1,537	فلاخجلاس 1989 (Flachglas)
	550	1,522	
	600	1,523	
	800	1,517	
	1000	1,514	
أسيتات-فينيل-الإثيلين EVA (Elvax 150) الرقاقة بعد عملية التصفيح A-9918 (لمدة 20 دقيقة عند 149 C)	400	1,49	جويريس(Gueris) 1991
	600	1,47	
	800	1,45	
	1000	1,44	
	1200	1,43	
TiO2 (مرسب عند درجة حرارة 300 C)	400	2,73	جيليسون وآخرون ((Jellison [et al.] 1985
	550	2,43	
	600	2,39	

	2,30	800	
	2,27	1000	
CRC 1994	5,61	354	سليكون
باليك (Palik) 1985	5,57	400	
CRC 1994	4,32	496	
باليك 1985	3,95	600	
CRC 1994	3,75	729	
باليك 1985	3,69	800	
	3,57	1000	

الجدول (أ-11): معاملات الامتصاص (α) عند أطوال موجية (λ) مختلفة و $T = 25\ C^{o}$

المرجع	τ	α (m^{-1})	λ (nm)	d (mm)	المادة
فلاخجلاس 1989 (Flachglas)	0.912	1.22	400	2	زجاج (Optiwhite) زجاج مقوّى كيميائياً (CGS)
	0.917	0.456	550		
	0.914	1.96	700		
	0.911	4.38	850		
	0.910	5.31	1000		
جويريس 1991 (Gueris)	0.787	323.20	390	0.5	(Elvax 150) EVA الرقاقة بعد التصفيح A-9918 (لمدة 20 دقيقة عند 149 °C)
	0.918	26.15	543		
	0.923	23.65	705		
	0.923	25.20	831		
	0.925	25.75	1026		

الجدول (أ-12): سُمك مواد التغليف المطبقة

سمك المواد في الجانب الأمامي للمنظومة الفولتضوئية (mm)

نوع المنظومة	زجاج	EVA	TiO_2	Si	المرجع
Solarex IV	4.75	0.91	0.75 µm	0.305	هويلشر 1981 (Hoelscher)
SM 55	3.00	0.5	0.75 µm	0.450	سيمنس 1991 (Siemens)
PQ 40/50	2.00	0.5	0.75 µm	0.350	تيليفنكن (Telefunken) 1991

سمك المواد في الجانب الخلفي للمنظومة الفولتضوئية (mm)

نوع المنظومة	EVA	ألياف زجاجية	تيدلر (Tedlar)	زجاج	المرجع
Solarex IV	0.457	[1] 0.13	0.1	0	هويلشر 1981 (Hoelscher)
SM 55	0.5	0	[2] 0.150	0	سيمنس 1991 بالمر (Palmer) 1992
PQ 40/50	0.5	0	0	2	تيليفنكن (Telefunken) 1991

ملاحظات:

[1] مع طبقة أسيتات-فينيل-الإثيلين (EVA) الثانية، السُمك 0.457 mm أيضاً.

[2] تصفيح تيدلر (37.5 µm) - بوليستر (75 µm) - تيدلر (37.5 µm).

الجدول (أ-13): الموصلية الحرارية (k) لمواد نموذجية للأنظمة الفولتضوئية

المادة	T (°C)	k ($W \cdot m^{-1} K^{-1}$)	المرجع
مواد الخلية:			
سيليكون	−23	191	2005 CRC
	27	148	2005 CRC
	77	119	2005 CRC
جرمانيوم	−23	74.9	2005 CRC
	27	59.9	2005 CRC
	77	49.5	2005 CRC
GaAs		54	هيوانج/مولر 1980 (Heywang/Müller)
SiO_2	0	140	1994 CRC
	100	160	1994 CRC
ZnO	200	17	1994 CRC
MgO	100	36	1994 CRC
TiO_2	100	6.5	1994 CRC
TiO_2 (موازية لاتجاه البلورة)	0	13	1994 CRC
	36	12.6	كراوفورد/كارسون (Crawford/Carson)
	67	13.8	كراوفورد/كارسون
TiO_2 (عمودية على اتجاه البلورة)	0	9	1994 CRC
	44	8.8	كراوفورد/كارسون
	67	7.1	كراوفورد/كارسون
المنظومة/التغليف:			
زجاج (ASG 13.80)		1.00	غارسيا (Garcia) 1985
زجاج الصوان	20	0.78	كوشلنج (Kuchling) 1995
زجاج تاجي	20	1.07	كوشلنج (Kuchling) 1995
زجاج النوافذ	20	0.81	كوشلنج (Kuchling) 1995

المادة	T (°C)	k ($W \cdot m^{-1}K^{-1}$)	المرجع
زجاج الكوارتز	20	1.40	بير وآخرون (Bear [et al.]) 1995
EVA		0.35	غارسيا (Garcia) 1985
Elvax 150	20	0.3461	جويريس (دوبونت) Gueris (Du Pont) 1991
Elvax 450	20	0.3375	جويريس (دوبونت) 1991
سيليكون (Semicosil 912)	20	0.2	واكر (Wacker) 1990
رغوة متعدد اليوريثين (PU)	20	0.06	CRC 1994
بوليثيلين		0.5	هورنبوجن (Hornbogen) 1994
	20	0.35	بير وآخرون (Bear et al.) 1994
PMMA (Plexiglas أكريليكي)	20	0.184	بير وآخرون (Bear et al.) 1995
PTFE (تيفلون)		0.24	هورنبوجن (Hornbogen) 1994
بولي أميد (Polyamide)	20	0.29	بير وآخرون (Bear [et al.]) 1994
تيدلر (Tedlar)		0.167	غارسيا (Garcia) 1985
بنية الدعامة:			
ألمنيوم	−23	235	CRC 1994
	(20)	202	خارتشينكو (Khartchenko) 2004
	27	237	CRC 1994
	77	240	CRC 1994
نحاس	−23	406	CRC 1994
	(20)	385	خارتشينكو (Khartchenko) 2004
	27	401	CRC 1994
	77	396	CRC 1994
حديد	(20)	55	خارتشينكو (Khartchenko) 2004
فولاذ	20	47	ميندي/سيمون (Mende/Simon) 1981

المادة	T (°C)	k ($W \cdot m^{-1} K^{-1}$)	المرجع
	(20)	45	خارتشينكو (Khartchenko) 2004
فولاذ مقاوم للصدأ	0	14	2005 CRC
	100	16	2005 CRC
فولاذ Cr-Ni (X12CrNi18.8)	20	15	بير وآخرون (Bear [et al.]) 1994
فولاذ Cr (X8Cr17)	20	25	بير وآخرون (Bear [et al.]) 1995
زنك	20	121	بير وآخرون (Bear [et al.]) 1995
قصدير	20	67	بير وآخرون (Bear [et al.]) 1995
خرسانة	20	1.45	ستوكر (Stöcker) 1993
	(20)	1.73–0.8	خارتشينكو (Khartchenko) 2004
ثلج	0	2.2	2005 CRC
سيراميك	(20)	2.9–1.7	خارتشينكو (Khartchenko) 2004
جرانيت	20	2.90	بير وآخرون (Bear [et al.]) 1994
رخام	20	2.80	بير وآخرون (Bear [et al.]) 1994
جص	20	0.51	بير وآخرون (Bear [et al.]) 1994
أسفلت	20	0.06	2005 CRC
خشب: سنديان، الزان	20	0.17	ستوكر (Stöcker) 1993
خشب: الصنوبر	20	0.14	
ماء	0	0.5610	1994 CRC
	25	0.6071	
	50	0.6435	
هواء (جاف)	0	0.02454	جيك (Gieck) 2005
	20	0.0260	
	100	0.0320	
المادة	T (°C)	k ($W \cdot m^{-1} K^{-1}$)	المرجع

الجدول (أ-14): الانبعاثية الحرارية (λ) لمواد مختلفة

المادة	درجة الحرارة (°C)	ε	λ_ε (nm)	"معامل الإشعاع" (W/m^2K^4)	المرجع
الماء	0	0.95			هولمان (Holman) 1990
	100	0.96			هولمان (Holman) 1990
الزجاج	20	0.94			ويست (Weast) 1987
	22	0.94			هولمان (Holman) 1990
	34	0.81			تولوكيان (Touloukian) 1967
	90	0.88			كوشلينج (Kuchling) 1995
	100	0.91			ويست (Weast) 1987
	110	0.82			تولوكيان (Touloukian) 1967
ألمنيوم (مصقول)	20	0.04		0.30	كوشلينج (Kuchling) 1995
ألمنيوم (خام)	20	0.06		0.41	ميندي وآخرون (Mende [et al.]) 1981
ألمنيوم (مؤكسد)	20	0.30			كوشلينج (Kuchling) 1995
	200	0.11			ويست (Weast) 1987
فولاذ مقاوم للصدأ (مصقول)	100	0.07			هولمان (Holman) 1990
فولاذ مقاوم للصدأ	25	0.60			هولمان (Holman) 1990
فولاذ (جديد)	100	0.08			ويست (Weast) 1987
فولاذ (أكسيد قليل)	20	0.82			ويست (Weast) 1987
فولاذ (أكسيد كثير)	50	0.88			ويست (Weast) 1987
فولاذ (مطلي بالنيكل)	20	0.11			ويست (Weast) 1987
فولاذ (غير مؤكسد)	25	0.05			ويست (Weast) 1987
	100	0.06			ويست (Weast) 1987
زنك	28	0.23			هولمان (Holman) 1990
نحاس (مؤكسد)		0.76			خارتشينكو (Khartchenko) 2004

المادة	درجة الحرارة (°C)	ε	λ_ε (nm)	"معامل الإشعاع" (W/m^2K^4)	المرجع
نحاس (مصقول)		0.03			خارتشينكو (Khartchenko) 2004
فضة	100	0.02			ويست (Weast) 1987
ثاني أكسيد التيتانيوم	1,400	0.82	10,000		سالا (Sala) 1986
	1,400	0.89	15,000		سالا (Sala) 1986
أكسيد الزنك		0.15	550		ويست (Weast) 1987
سيليكون	1,000	0.79	100		سالا (Sala) 1986
	1,000	0.51	200		سالا (Sala) 1986
رخام (رمادي خفيف، مصقول)		0.95		5.37	خارتشينكو (Khartchenko) 1995
لبّاد سقف (felt)	21	0.91			هولمان (Holman) 1990
قرميد (فخار)	20	0.93			ميندي وآخرون 1981
		0.93			خارتشينكو (Khartchenko) 2004
خرسانة		0.97-0.88			خارتشينكو (Khartchenko) 2004
سنديان (مستوي)		0.91		5.16	خارتشينكو (Khartchenko) 1995
متعدد الكربونات	20	0.80			كوشلينج (Kuchling) 1982
طلاء أسود		0.97-0.95			خارتشينكو (Khartchenko) 2004
بلاستيك عضوي	20	0.90			كوشلينج (Kuchling) 1995
الجسم الأسود	جميعها	1.0		5.67	خارتشينكو (Khartchenko) 2004

تم تهيئة بيانات "معامل الإشعاع" لتبسيط عملية الحسابات وفقاً للمرجع خارتشينكو (Khartchenko) 1995، وصالحة فقط لمدى حراري صغير (100 °C-50 °C).

الجدول (أ–15): خصائص الهواء الجوي (وفقاً للمرجع VDI 1994)

T (°C)	ρ (kg/m³)	c_p $(kJ \cdot kg^{-1}K^{-1})$	β $(10^{-3}/K)$	k 10^{-3} $(W \cdot m^{-1}K^{-1})$	η 10^{6} $(Pa \cdot s)$	ν 10^{-7} (m^2/s)	Pr
0	1.275	1.006	3.674	24.18	17.24	135.2	0.7179
10	1.230	1.007	3.543	24.94	17.74	144.2	0.7163
20	1.188	1.007	3.421	25.69	18.24	153.5	0.7148
30	1.149	1.007	3.307	26.43	18.72	163.0	0.7134
40	1.112	1.007	3.200	27.16	19.20	172.6	0.7122
60	1.045	1.009	3.007	28.60	20.14	192.7	0.7100
80	0.9859	1.010	2.836	30.01	21.05	213.5	0.7083
100	0.9329	1.012	2.683	31.39	21.94	235.1	0.707

الجدول (أ–16): المواد التي تتكون منها أجهزة الحقن الشبكي المتعلقة بتوازن الطاقة

المادة	جميع المكونات مقاسة بـــ kg/kW وفقاً لجونسون وآخرون 1997 (2.5 kW)	العاكس مقاس بـــ kg/kW وفقاً لفريشكنيخت 1996 (500 kW)	المحول مقاس بـــ kg/kW وفقاً لفريشكنيخت 1996 (500 kW)	إلكترونيات التحكم مقاسة بـــ kg/kW وفقاً لفريشكنيخت 1996 (500 kW)
فولاذ	3.60	0.11	7.39	2.16
ألمنيوم	4.16	0.61	0.00	0.02
نحاس	2.24	0.32	20.80	0.12
سيليكون	-	0.00	0.00	0.00
سيراميك	0.08	0.21	0.00	0.00
PE منخفض الكثافة	0.12	0.22	3.62	0.13
PP	-	0.04	0.00	0.00
PVC	0.04	0.06	0.00	0.00
حمض كبريتيدي	-	0.00	0.00	0.02
ألياف زجاجية	-	0.00	2.50	0.00
غير محسوبة	-	0.09	0.35	0.14
المجموع	10.24	1.62	36.40	2.60

الجدول (أ-17): أسعار الصرف الرسمية للعملات المستخدمة لتحويل البيانات المستندة على اليورو (€) والمارك الألماني (DM) إلى الدولار الأميركي (US$) من عام 1975 إلى عام 2005 (متوسطات سنوية من قِبَل المصرف الاتحادي الأميركي (American Federal Bank) والمصرف الاحتياطي الاتحادي بنيويورك (Federal Reserve Bank of New York))

السنة	سعر صرف DM لكل US$ (متوسط سنوي)
1975	2.447
1976	2.538
1977	2.342
1978	2.031
1979	1.845
1980	1.798
1981	2.237
1982	2.415
1983	2.527
1984	2.819
1985	2.994
1986	2.215
1987	1.827
1988	1.746
1989	1.881
1990	1.636
1991	1.653
1992	1.561
1993	1.643
1994	1.633
1995	1.444
1996	1.541
1997	1.735
1998	1.760

السنة	سعر صرف € لكل US$ (متوسط سنوي)
1995	(0.7383)
1996	(0.7696)
1997	(0.8870)
1998	(0.8997)
1999	0.9387
2000	1.0835
2001	1.1171
2002	1.0578
2003	0.8833
2004	0.8040
2005	0.8253

السعر الثابت منذ 1998/12/31 هو:
1.95583 DM = 1 €

القيم التي بين القوسين تستند إلى سعر صرف الدولار الأميركي (US$) مقابل المارك الألماني (DM) (كما هي مبينة يميناً).

الجدول (أ-18): متطلبات الطاقة الأساسية الأحفورية وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون

الوقود (شدة ثاني أكسيد بـ kg/kg وفقاً للجدول (أ-2))	فحم حجري (2.73)	فحم ليجنيت (0.94)	غاز طبيعي (2.29)	ديزل (3.27)	مجموع CO_2
الدول المصدرة للألمنيوم	55 kg	0	5 kg	2.2 kg	138.8
الدول المصدرة للنحاس	187 kg	0	19 kg	5.5 kg	572.0 kg
غرب ألمانيا	96 kg	228 kg	27 kg	2.2 kg	545.4 kg

الجدول (أ-19): معايير الأنظمة الفولتضوئية ومكوناتها (المصدر: IEC 8/ 2000)

معيار IEC (السنة)	المعيار الأوروبي (السنة)	العنوان
IEC 60364-7-712		التنصيبات الكهربائية للمباني – الجزء 7-712: متطلبات التنصيبات الخاصة أو الأماكن – أنظمة إمداد القدرة الفولتضوئية
IEC 60891 (1987-04)	DIN EN 60891 (1996-10)	طرق تصحيح درجة الحرارة والإشعاعية للخصائص المميزة I-V المقاسة للأجهزة الفولتضوئية السيليكونية البلورية
IEC 60891-am 1 (1992-06)		التعديل 1 للمعيار IEC 60891
IEC 60904-1 (1987-12)	DIN EN 60904-1 (1995-04)	الأجهزة الفولتضوئية، الجزء 1: قياسات الخصائص المميزة للتيار-الجهد
IEC 60904-2 (1989-05)	DIN EN 60904-2 (1995-04)	الأجهزة الفولتضوئية، الجزء 2: متطلبات للخلايا الشمسية المرجعية
IEC 60904-2-am 1 (1998-02)		التعديل 1 للمعيار IEC 60904-2
IEC 60904-3 (1989-02)	DIN EN 60904-3 (1995-04)	الأجهزة الفولتضوئية، الجزء 3: قواعد قياس الأجهزة الفولتضوئية الشمسية الأرضية مع بيانات إشعاعية طيفية مرجعية
IEC 60904-5 (1993-10)	DIN EN 60904-5 (1996-07)	الأجهزة الفولتضوئية، الجزء 5: إيجاد درجة الحرارة المكافئة للخلية (ECT) للأجهزة الفولتضوئية بطريقة جهد الدائرة المفتوحة
IEC 60904-6 (1994-09)	DIN EN 60904-6 (1996-02)	الأجهزة الفولتضوئية، الجزء 6: متطلبات المنظومات الشمسية المرجعية
IEC 60904-6-am 1 (1998-02)		التعديل 1 للمعيار IEC 60904-6
IEC 60904-7 (1998-03)		الأجهزة الفولتضوئية، الجزء 7: حساب خطأ عدم التوافق الذي ظهر في الفحص لجهاز فولتضوئي
IEC 60904-8 (1998-02)		الأجهزة الفولتضوئية، الجزء 8: إرشادات لقياس الاستجابة الطيفية للجهاز الفولتضوئي

معيار IEC (السنة)	المعيار الأوروبي (السنة)	العنوان
IEC 60904-9 (1995-09)		الأجهزة الفولتضوئية، الجزء 9: متطلبات أداء المحاكي الشمسي
IEC 60904-10 (1998-10)		الأجهزة الفولتضوئية، الجزء 10: طرق قياس الاستقامة الخطية
IEC 61173 (1992-09)	DIN EN (IEC) 61173 (1996-10)	الحماية من الجهد الزائد لأنظمة توليد القدرة الفولتضوئية - إرشادات
IEC 61194 (1992-12)	EN (HD) 61194 (1996-07)	العوامل المميزة للأنظمة الفولتضوئية القائمة بذاتها
IEC 61215 (1993-04)	DIN EN 61215 (1996-10)	المنظومات الفولتضوئية السيليكونية البلورية الأرضية – كفاءة التصميم والمصادقة على النوع
IEC 61277 (1995-03)	E DIN IEC (CO) 19 (1989-10)	أنظمة توليد القدرة الفولتضوئية الأرضية – عام وإرشادات
IEC 61345 (1998-02)		فحص الأشعة فوق البنفسجية للمنظومات الفولتضوئية
IEC 61427 (1999-11)		بطاريات وخلايا ثانوية لأنظمة الطاقة الفولتضوئية – متطلبات عامة وطرق الفحص
IEC 61646 (1996-11)		المنظومات الفولتضوئية الأرضية ذات الأغشية الرقيقة – كفاءة التصميم والمصادقة على النوع
IEC 61683 (1999-11)		أنظمة فولتضوئية – مكيفات القدرة – طريقة قياس الكفاءة
IEC 61701 (1995-03)	E DIN IEC 1701 (1996-10)	إجراء فحص التآكل بالغشاء الملحي للمنظومات الفولتضوئية
IEC 61702 (1995-03)		تصنيف الازدواجية المباشرة لأنظمة الضخ الفولتضوئية
IEC 61721 (1995-03)	E DIN IEC 1721 (1996-10)	قابلية المنظومة الفولتضوئية لأضرار التأثيرات العرضية (فحص المقاومة ضد التأثيرات)
IEC 61724 (1998-11)		مراقبة أداء النظام الفولتضوئي – إرشادات القياس، وتبادل البيانات، والتحليل
IEC 61725 (1997-05)		تعبير تحليلي للملامح الشمسية اليومية

معيار IEC (السنة)	المعيار الأوروبي (السنة)	العنوان
IEC 61727 (1995-06)		الأنظمة الفولتضوئية – خصائص الربط بالمَرفق العمومي
IEC 61730-1		كفاءة سلامة النظام الفولتضوئي – الجزء 1: متطلبات التشييد
IEC 61730-2		كفاءة سلامة النظام الفولتضوئي – الجزء 2: متطلبات إجراء الفحص
IEC 61829 (1995-03)		المصفوفة الفولتضوئية السيليكونية البلورية – قياس الخصائص المميزة I-V على الموقع
IEC6/TR2 61836 (1997-10)		أنظمة الطاقة الفولتضوئية الشمسية – المصطلحات والرموز
IEC 61836-2		أنظمة الطاقة الفولتضوئية الشمسية – المصطلحات والرموز – الجزء 2
IEC 61853		تصنيف الطاقة والقدرة للمنظومات الفولتضوئية
IEC 62078		برنامج مصادقة واعتماد الأنظمة والمكونات الفولتضوئية – إرشادات للجودة الكاملة للنظام
IEC 62108		مستقبلات ومنظومات التركيز الفولتضوئي – كفاءة التصميم والمصادقة على النوع
IEC 62109		السلامة الكهربائية للعاكسات الساكنة وأجهزة تحكُّم الشحن من أجل الاستخدام في أنظمة القدرة الفولتضوئية
IEC 62116		طريقة إجراء الفحص – إجراءات منع العزل لمكيفات القدرة المستخدمة في أنظمة توليد القدرة الفولتضوئية المتصلة بالشبكة
IEC 62124		الأنظمة الفولتضوئية القائمة بذاتها – كفاءة التصميم والمصادقة على النوع
IEC 62145		المنظومات الفولتضوئية السيليكونية البلورية ـــ نموذج فارغ للمواصفات التفصيلية

مقترحات:

معيار IEC (السنة)	المعيار الأوروبي (السنة)	العنوان
1173 (1992-08)	DIN EN (IEC) 61173 (1996-10)	الحماية من الارتفاع المفاجئ للجهد لأنظمة توليد القدرة الفولتضوئية – إرشادات
1194 (1992-12)	EN (HD) 61194 (1996-07)	العوامل المميزة للأنظمة الفولتضوئية القائمة بذاتها
1277 (1995-02)	E DIN IEC (CO) 19 (1989-10)	أنظمة توليد القدرة الفولتضوئية الأرضية – عام وإرشادات
904-3 (1989-03)	DIN EN 60904-3 (1995-04)	الأجهزة الفولتضوئية، الجزء 3: قواعد قياس الأجهزة الفولتضوئية الشمسية الأرضية مع بيانات إشعاعية طيفية مرجعية
904-5 (1993-11)	DIN EN 60904-5 (1996-07)	الأجهزة الفولتضوئية، الجزء 5: إيجاد درجة الحرارة المكافئة للخلية (ECT) للأجهزة الفولتضوئية بطريقة جهد الدائرة المفتوحة
904-6 (1994-09)	DIN EN 60904-6 (1996-02)	الأجهزة الفولتضوئية، الجزء 6: متطلبات المنظومات الشمسية المرجعية
904-7 (1995-09)		الأجهزة الفولتضوئية، الجزء 7: حساب خطأ عدم التوافق الذي ظهر في الفحص لجهاز فولتضوئي
904-8 (1995-09)		الأجهزة الفولتضوئية، الجزء 8: إرشادات لقياس الاستجابة الطيفية للجهاز الفولتضوئي
904-9 (1995-09)		الأجهزة الفولتضوئية، الجزء 9: متطلبات أداء المحاكي الشمسي
1215 (1993-04)	DIN EN 61215 (1996-10)	المنظومات الفولتضوئية السيليكونية البلورية الأرضية – كفاءة تصميم المنظومة والمصادقة على التصميم
1701 (1995-03)	E DIN IEC 1701 (1996-10)	إجراء فحص التآكل بالغشاء الملحي للمنظومات الفولتضوئية
1721 (1995-03)	E DIN IEC 1721 (1996-10)	قابلية المنظومة الفولتضوئية لأضرار الصدمات العرضية (فحص المقاومة ضد التأثيرات)
1886		المصطلحات المستخدمة في المعايير الفولتضوئية ICE

مقترحات:

معيار IEC (السنة)	المعيار الأوروبي (السنة)	العنوان
1345		فحص الأشعة فوق البنفسجية للمنظومات الفولتضوئية
1646		المنظومات الفولتضوئية الأرضية ذات الأغشية الرقيقة – كفاءة التصميم والمصادقة على النوع
1730		متطلبات فحص السلامة للأنظمة الفولتضوئية
1798		قياس الاستقامة الخطية للجهاز الفولتضوئي
1849		المصادقة على التصميم والنوع للمنظومات الفولتضوئية للبيئات البحرية
1853		تصنيف الطاقة والقدرة للمنظومات الفولتضوئية
	DIN 40025	صحيفة بيانات وتصنيف معلومات اللوح للمنظومات الفولتضوئية

بالرغم من أنه قد تم إنشاء المعيار ISO 9000ff لأغراض إدارة الجودة، إلاّ أن قوانين ISO 14000ff تم إعدادها مؤخراً في أيار/ مايو 1993 للإدارة البيئية ضمن لجنة فنية جديدة تسمى TC 207. هذه اللجنة شكّلت لجاناً فرعية لمواضيع مختلفة، حيث قامت بجمع المتطلبات العامة للمعايير المتوافقة. وتفاصيل مجموعات العمل رشحت لتحديد الصياغات والقيم (مثلما في جميع مشاريع ISO). وبالنسبة إلى الحالة ISO TC 207، تم إعداد اللجان الفرعية المبينة في الجدول (أ–20).

الجدول (أ-20): قوانين المعيار ISO 14000ff

الاسم/الوصف	اللجنة الفرعية	ISO
نظام الإدارة البيئية	SC 1	ISO 14000 - 14004
التدقيق البيئي	SC 2	ISO 14010ff
التصنيف البيئي	SC 3	ISO 14020ff
تقويم الأداء البيئي	SC 4	ISO 14031ff
تحليل دورة الحياة	SC 5	ISO 14040ff

إلى جانب هذه المعايير فإن قوانين أخرى أيضاً، مثل التدقيق البيئي السويسري، تستخدم من قِبَل الشركات. هذه وغيرها من التوازنات البيئية الأخرى لها ميزة سيئة وهي أنها صعبة المقارنة، بالرغم من أنها تستخدم نقاط مرجعية مختلفة، مثلاً الحدود المختلفة التي يتم فيها تنفيذ التوازنات تقود إلى نتائج مختلفة لإيجاد تدفقات الطاقة والمادة. والجهود المبذولة من قِبَل جمعية تسمى "جمعية تعزيز دورة الحياة" "SPOLD" (Society for the Promotion of Life-Cycle Assessment Development) تحاول استخدام صيغة بيانات شائعة لجميع البيانات التي تم الحصول عليها، انظر تقرير VDI رقم 1328. ولتبسيط المقارنة بين عمليات المسح المختلفة، يتم تراسل المنشورات عن طريق الإنترنت منذ عام 1997.



الثبت التعريفي

احتباس حراري عالمي (Global Warming): هو ارتفاع درجة حرارة الغلاف الجوي للأرض، ويرجع جزء كبير منه إلى انبعاث نواتج احتراق الوقود الأحفوري، وخصوصاً ثاني أكسيد الكربون، إلى الغلاف الجوي.

استهلاك غير طاقي (Nonenergetic Consumption): هو استخدام حاملات الطاقة كمواد خام وليس كوقود (مثلاً، النفط المعدني المستخدم لتصنيع البلاستيك)، أي عدم استخدام محتوى طاقتها المتأصل بالإحراق.

أشباه الموصلات **(Semiconductors)**: هي مواد لها خصائص كهربية وسطية بين المواد العازلة والمواد الموصلة .

أشعة كلِّية (الواصلة للأرض) (Global Radiation): يقصد بها الطاقة الشمسية الكلِّية المرتطمة بالأرض. وتتكون الأشعة الكلِّية من الأشعة الشمسية المباشرة والأشعة الشمسية الانتشارية. والنسبة بين أحد أنواع الطاقة إلى النوع الآخر يعتمد على زاوية سقوط أشعة الشمس.

أشعة مباشرة/ انتشارية (Direct/Diffuse Radiation): الأشعة المباشرة هي الأشعة التي تسقط على السطح من دون أن تعاني من أي تشتت بواسطة مكونات الغلاف الجوي للأرض. والأشعة الانتشارية (غير المباشرة) هي أقل شدة نتيجة للتشتت من السديم، أو الضباب، أو السحب، أو غيرها.

إعادة الاتحاد (Recombination): يقصد به إعادة الاتحاد بين الإلكترون والفجوة.

إعادة التدوير (Recycling): هي عملية إعادة تصنيع واستخدام المخلفات، سواء المنزلية أو الصناعية أو الزراعية، وذلك للتقليل من تأثير هذه المخلفات وتراكمها على البيئة. وتتم هذه العملية عن طريق تصنيف وفصل المخلفات على أساس المواد الخام الموجودة بها ثم إعادة تصنيع كل مادة على حدة.

إنفاق الطاقة المتراكِمة (Cumulated Energy Expense): إنفاق الطاقة المتراكِمة لنظام إمداد الطاقة يشتمل على المادة وتدفقات الطاقة المطلوبة في أثناء التصنيع، والتشغيل، وإعادة التدوير. ويعطي إنفاق الطاقة المتراكِمة حساب الإنفاق الإجمالي للطاقة المصروفة في إنتاج، واستعمال، وتسويق المادة، وأي مسبب آخر يرتبط بها.

إيترنيت (Eternit): هو الاسم التجاري لألياف الاسمنت، وهي مادة قوية تُستعمل غالباً للمباني والمنشآت.

بطارية التخزين (Storage Battery): تستخدم بطارية التخزين أينما يتم توليد طاقة كهربائية ويتطلب تخزينها للاستخدام عند الحاجة في وقت لاحق.

بياض (Albedo): هو الأشعة الشمسية المنعكسة من سطح

الأرض على منظومة الخلايا الشمسية، ويعتمد البياض كثيراً على خصائص سطح الأرض المحيط بالمنظومة، ومن الصعب جداً حسابه بدقة.

بيرانوميتر (Pyranometer): هو جهاز لقياس الإشعاع السماوي.

تحسين «إلى حالة فضلى» (Optimization): ويقصد به تحقيق الحد الأعلى للمردود السنوي للطاقة الكهربائية. وهذه المهمة يتم تنفيذها عن طريق دراسة تأثير البيئة الفعلية من حيث الإشعاعية، والانعكاسات البصرية، ودرجة حرارة الوسط المحيط، والرياح، وأداء المكونات المختلفة وتفاعلاتها أيضاً.

تحليل دورة الحياة ((Life Cycle Analysis (LCA)): تعني الدراسات السابقة والحالية واللاحقة قبل وفي أثناء وبعد عملية الإنتاج آخذين في الحسبان البعد الاقتصادي والبيئي والاجتماعي المحلي والعالمي لهذه الصناعة.

ترانزيستور (Transistor): كلمة transistor أساساً مؤلفة من كلمتي "Transfer Resistor" (وتعني مقاومة النقل). والترانزستور عبارة عن وصلتين لثلاث مناطق من مادة شبه موصلة (مثل الجرمانيوم أو السليكون) مطعمة. المنطقة الوسطى فيه تسمى «القاعدة» وتتكون من بلورة رقيقة جداً من النوع الموجب (P) أو السالب (N)، بينما البلورتان الخارجيتان ("الباعث» وعليه سهم يشير إلى اتجاه سريان التيار فيه، و"المجمع") هما من نوع مخالف للقاعدة. واختُرِع الترانزستور سنة 1948 في معامل «بل» (Bell) من قبل الأميركيين والتر براتين، ووليام شوكلي، وجون باردين، ويعتبر في الوقت الحاضر من أهم القطع الإلكترونية حيث يدخل في تركيب معظم الدوائر الحديثة المتقدمة.

تروبوسفير (éroposphere): هي الطبقة السفلى من الغلاف الجوي.

تطعيم شبه الموصل (Doping): يعني إضافة ذرات عناصر شائبة إلى شبه الموصل النقي (مثل السيليكون) وذلك إما لزيادة عدد الإلكترونات (بإضافة عناصر من المجموعة الخامسة مثل الفوسفور) أو عدد الفجوات (بإضافة عناصر من المجموعة الثالثة مثل البورون).

تفريغ ذاتي للبطارية (Self Discharge): يحدث التفريغ الذاتي عندما تكون البطارية في دائرة مفتوحة، وبشكل أساسي نتيجة التفاعل بين القطبين والإلكتروليت. ويؤدي تفاعل التفريغ الذاتي إلى تصاعد غاز وانخفاض في سعة تركيز الإلكتروليت. ومعدل التفريغ الذاتي يزداد مع ارتفاع درجات الحرارة وزيادة عدد دورات الشحن/ التفريغ.

تكبْرُت (Sulfation): هو تشكُّل بلورات كبيرة من كبريتات الرصاص ($PbSO_4$) على القطب الموجب لبطارية حمض الرصاص. ويحدث التكبْرُت عادة بعد التفريغ بتيارات منخفضة (تيارات التفريغ الذاتي) بسبب تطبُّق (تكوُّن الطبقات) وتبلور الحمض .وتحدث هذه العملية أيضاً عندما يتم تخزين البطارية لفترة طويلة من الزمن في حالة مفرغة، إذا لم يتم شحنها كاملاً، أو إذا أصبح مستوى الإلكتروليت منخفضاً بصورة غير عادية نتيجة الفقد المتزايد للماء من عملية الشحن الزائد و/أو التبخير .ويمكن تصحيح التكبْرُت غالباً عن طريق الشحن البطيء جداً (بتيار منخفض) عند جهد أعلى من المعتاد، عادة عند حوالي 2.4 إلى 2.5 V لكل خلية من خلايا بطارية عند 0.5 إلى 8 A (اعتماداً على حجم البطارية). وهذا سيزيل التكبْرُت تدريجياً في معظم الأحوال.

تمثيل ضوئي (Photosynthesis): هو عملية تحويل الطاقة

الضوئية، أو الطاقة الكهرومغناطيسية القادمة من الشمس، في النبات إلى طاقة كيميائية مخزونة. وهناك أيضاً تمثيل ضوئي بكتيري. الاختلاف الهام بين التمثيل الضوئي للنبات والتمثيل الضوئي البكتيري يكمن في طريقة استخدام الطاقة الضوئية المحوّلة. التمثيل الضوئي للنبات يحوّل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية مخزونة ليتم استخدامها فيما بعد في التنفس. وعلى العكس من ذلك، يستهلك التمثيل الضوئي البكتيري معظم الطاقة الضوئية ولا يخزن الكثير من الطاقة المحوّلة كطاقة كيميائية.

تيار دارة القصر (Short-Circuit Current): هو أحد الخصائص الهامة جداً للخلية الشمسية. ويحدث هذا التيار في الخلية الشمسية المضاءة ذات الدارة المقصَرة.

تيدلر (Tedlar): هو الاسم التجاري لرقاقة الفلوريد متعدد الفينيل (PVF).

ثقل نوعي (Specific Gravity): هو النسبة بين كثافة المادة إلى الكثافة المرجعية. ويتم حساب الثقل النوعي عند الظروف المعيارية باستخدام كثافة ماء عذب ككثافة مرجعية.

جهاز التحكُّم بالشحن (Charge Controller): هو جهاز وسيط بين التيار المباشر وبطارية التخزين، حيث يقوم جهاز التحكُّم بالشحن بتنظيم عملية شحن وتفريغ بطاريات التخزين.

جهد الدائرة المفتوحة (Open-Circuit): يمكن وصف الجهد بين التلامسين إذا لم يمر أيّ تيار (دائرة مفتوحة).

جهد الغمر (Float Voltage): هو الجهد الذي تكون عنده البطارية «مغمورة» أو عندما يتم فقط تزويد تيار كافي لمعادلة التفريغ

الذاتي للبطارية. وهذا الجهد عادة هو حوالي 14.2 V إلى 14.5 V للبطارية 12 V.

حساسية طيفية (Spectral Sensitivity) أو الاستجابة الطيفية (Spectral Response) للخلية الشمسية: تُعرَّف بأنها كثافة الفوتون مقسومة على شدة الإشعاع الساقط (الإشعاعية).

خرج مسموح به (Output Tolerance): ويقصد به أقصى انحراف عن القدرة الاسمية. ويشير منتجو المنظومات الفولتضوئية إلى ذلك بـ 3.5% أو 10%.

خلية شمسية (Solar Cell): هي عبارة عن وصلة ثنائية (دايود) شبه موصلة، عادة من السليكون، ولكن بمساحة أكبر. وتنطلق حاملات الشحنة الموجبة والسالبة في الخلية الشمسية عندما تسقط عليها الأشعة الضوئية أو الحرارية (الظاهرة الكهروضوئية) فيتولد بالتالي تيار مباشر.

خلية وقود (Fuel Cell): خلية الوقود هي خلية مستندة إلى الهيدروجين والأوكسجين وهي ببساطة جهاز للتحليل الكهربائي العكسي؛ حيث تنتج طاقة كهربائية عندما تتم تغذيتها بالوقود (الهيدروجين والأوكسجين). ويتم تغذية وقود الهيدروجين من خلال أنود (مَصعد) الخلية والأوكسجين من خلال الكاثود (المهبط)، ويتولد كهرباء، وماء، وحرارة عن طريق تفاعل كيميائي في داخل الخلية.

دُبال (Humus): هي مادة عضوية منحلّة.

زمن استرداد الطاقة (Energy Pay-Back Time): هو الزمن اللازم لإنتاج الكمية نفسها من الطاقة المطلوبة لبناء جهاز القدرة.

على سبيل المثال، زمن استرداد الطاقة للخلايا الفولتضوئية هو حوالي 1–5 سنوات، وهذا يعتمد بشكل أساسي على الموقع.

زمن استهلاك دَيْن الطاقة (Energy Amortization Time): هو العلاقة بين كمية الطاقة المستخدمة للإنتاج وكمية الطاقة المتولدة. وبمعنى آخر، زمن استهلاك دَين الطاقة يشير إلى الزمن الذي استغرقته، مثلاً المنظومة الشمسية، حتى تبدأ بإمداد الطاقة المطلوبة لإنتاجها على شكل كهرباء.

شبه الموصل نوع-سالب (N-type Semiconductor): هو شبه الموصل الذي أدى تطعيمه بشوائب من المجموعة الخامسة في الجدول الدوري إلى فائض في عدد الإلكترونات الحرة فيه أكثر من عدد الفجوات.

شبه الموصل نوع-موجب (P-type Semiconductor): هو شبه الموصل الذي أدى تطعيمه بشوائب من المجموعة الثالثة في الجدول الدوري إلى فائض في عدد الفجوات فيه أكثر من الإلكترونات الحرة.

طاقة متجددة (Renewable Energy): هي الطاقة المتوفرة بشكل غير محدود تقريباً، وتحمل تكاليف ثانوية مهملة، وتكلفتها ذات ميول استطرادي، ولها قبول اجتماعي جيد من قِبَل السكان.

طبقة (الطلية) مضادة للانعكاس (Antireflective Layer (Coating)): هي طبقة مطلية في أعلى سطح الخلية تمنع أدنى قدر من الأشعة الساقطة قدر الإمكان من أن تنعكس.

ظاهرة الدفيئة (Greenhouse Effect): هي احتباس حراري ناتج عن امتصاص ضوء الشمس المنعكس والانبعاث المتتالي للأشعة

تحت الحمراء من سطح الأرض، وذلك لأن غازات الدفيئة تسمح لضوء الشمس بالدخول إلى الأرض ومن ثم احتجاز الأشعة تحت الحمراء المعاد إشعاعها ثانية.

عاكس (Inverter): هو جهاز يقوم بتحويل التيار المباشر المتولد بواسطة المنظومات الشمسية إلى تيار متردد (متناوب) يمكن نقله إلى الشبكة العمومية. ويمكن تركيب العاكسات داخل أو خارج المباني اعتماداً على نوع إنتاج الطاقة. وحيث إنها تولد حرارة وكفاءتها تنخفض عندما تكون درجة حرارة الوسط المحيط مرتفعة، لذا يفضل تركيبها في غرف باردة أو على جانب مظلل للمبنى. وعملية اختيار العاكس الصحيح له تأثير كبير على كفاءة/ خرج المنظومة الفولتضوئية.

عامل تعبئة (Fill Factor): هو نسبة القدرة القصوى إلى القدرة المثلى.

عمق التفريغ (Depth of Discharge): هو المستوى الذي يمكن فيه استخدام البطارية قبل أن تفرغ نهائياً. في مختلف أنواع البطاريات، يمكن عادة استخدامها حتى سعتها الكاملة، إلاّ أنه يجب تجنب ذلك في بطارية حمض الرصاص؛ لأنه في هذه الأنواع من البطاريات، كلما كبر عمق التفريغ كلما قصر العمر الزمني للبطارية، وذلك بسبب التركيز المتناقص لحمض الكبريتيك مع زيادة عمق التفريغ.

فجوة (Hole): الفجوة في شبه الموصل هي مكان شاغر في الغيمة الإلكترونية لبعض ذرات نصف الموصل تنتج بفعل الطاقة الحرارية أو بفعل التذميم (Doping)، وتحمل شحنة موجبة.

فوتون (Photon): هو جسيم أولي صغير يتكوّن منه الضوء، وله طاقة صغيرة جداً تعتمد على تردده. ويحمل الفوتون سمات الإشعاع الكهرومغناطيسي كما إنه ناقل للطاقة الكهرومغناطيسية، ويمتاز بأنه عديم الكتلة والشحنة وينتقل في الفراغ بسرعة الضوء.

فولتضوئية (Photovoltaic): تعني توليد الكهرباء من القدرة الشمسية.

قاعدة RGT (RGT-Rule): هي اختصار للعبارة (Rule Growing based on Tests). ووفقاً لهذه القاعدة، فإن زيادة درجة الحرارة بمقدار 10 K تؤدي إلى مضاعفة سرعة التفاعلات الكيميائية الحيوية إلى الحد الأعلى لدرجة الحرارة (حوالي $60^{o}C$ للإنزيمات).

قدرة كهربائية قصوى (Maximum Power): تُعرَّف القدرة الكهربائية القصوى، P_{max}، بأنها الناتج الأعلى من حاصل الضرب بين V و I عند نقطة التشغيل.

القدرة المثلى (Optimum Power) للخلية الشمسية: هي القدرة التي يمكن قياسها من الطرف (Lead)، وهي حاصل ضرب تيار دائرة القصر وجهد الدائرة المفتوحة.

كتلة حيوية (Biomass): هي المادة التي تتشكلت أساساً نتيجة التمثيل الضوئي (Photosynthesis)، وتتضمن المواد العضوية من نباتات ومخلفات حيوانية، التي يمكن إحراقها مباشرة أو تحويلها إلى وقود.

كتلة هوائية (Air Mass): هو طول المسار البصري للضوء الصادر من مصدر سماوي (كالشمس مثلاً) خلال الغلاف الجوي للأرض.

كفاءة تحويل فولتضوئي (Photovoltaic Conversion Efficiency): هي النسبة بين القدرة الكهربائية المُخرَجة إلى القدرة الإشعاعية على الخلية الشمسية، وتعتمد هذه الكفاءة على الإشعاعية والطيف.

كفاءة طيفية للخلية الشمسية (Spectral Efficiency): هي الطاقة الكهربائية المُخرَجة بالنسبة إلى الطاقة الإشعاعية، وتنخفض كلما قلّت الأطوال الموجية.

كفاءة كمية (Quantum Efficiency): هي قدرة الخلية الشمسية على تحويل الفوتون الساقط بطول موجي معيّن إلى زوج إلكترون-فجوة.

مخططات سانكي (Sankey Diagrams): تُستخدم هذه المخططات للتمييز بين استهلاك الطاقة المباشر وغير المباشر.

مستوى الكفاءة (Efficiency Level): مستوى الكفاءة أو درجة التحويل هي نسبة تدل على كمية الطاقة الشمسية الساقطة التي تم تحويلها إلى طاقة صالحة للاستخدام.

معامل درجة الحرارة (Temperature Coefficient): معامل درجة الحرارة يدل على النسبة المئوية الذي انخفض فيه خرج المنظومة (أي المردود الكهربائي) مع ارتفاع درجة حرارة الخلية. وتعطي الألواح الشمسية أقصى أداء لها عند ظروف درجات الحرارة الباردة، والسماء الصافية، والكم الكبير من أشعة الشمس.

منشار التثقيب المستدير (In-Hole Saw): هو منشار مستدير لقطع قوالب السليكون ينتج رقاقة واحدة فقط في الوقت نفسه. وأغلب مناشير التثقيب المستديرة تؤدي إلى فقد في القَطْع قدره 50%

عند أقل سُمك للرقاقة 0.45 mm (سواءً أكانت الرقاقة أحادية أو متعددة البلورة).

منشار السلك ـ الملاط (Slurry-Wire Saw): هو منشار سلكي لقطع قوالب السليكون البلورية إلى رقاقات أحادية أو متعددة البلورة ونحيفة (0.2 mm) وبأقل تشوهات بلورية. وهذا يقلل من استنفاد السليكون ومحصلة استهلاك الطاقة. علاوة على ذلك، يمكن قطع عدة مئات من الرقاقات في الوقت نفسه - وحتى القالب البلوري بأكمله (البالغ طوله 1.6 m) يمكن تشريحه إلى رقاقات. في هذه التقنية، يتم مد سلك سماكته 0.18 mm وطوله بحدود 200 km بواسطة أربع أسطوانات توجيه دوّارة إلى مربع بينما يتحرر السلك من بكرة اللف بسرعة .5 m/s وتُجرى عملية القطع باستخدام كربيد سليكون بحجم حُبيْبي 12 in معلَّق في زيت القَطْع. يعمل زيت القَطْع كحامل لكربيد السليكون وأيضاً لنقل الحرارة.

منطقة حيز الشحنة (Space-Charge Region): تنشأ هذه المنطقة نتيجة اللااختلاف في تركيز الشحنات عند الحد الفاصل (الوصلة) بين المنطقتين (نوع س) و (نوع م)، فتنتشر الإلكترونات إلى المنطقة نوع -م والفجوات إلى المنطقة نوع -س، وبالتالي ينشأ مجال كهربي في الوصلة التي كانت متعادلة كهربياً سابقاً (نمو منطقة حيز الشحنة). تستمر هذه المنطقة بالنمو إلى أن تقوم بإيقاف المزيد من الانتشار الفعلي لحاملات الشحنة

منطقة-س (N-Region): هي منطقة في بلورة شبه الموصل تكون أكثرية ناقلات الشحنة فيها الإلكترونات.

منطقة-م (P-Region): هي منطقة في البلورة تكون أكثرية ناقلات الشحنة فيها الفجوات.

منظومة شمسية (Solar Module): المنظومة الشمسية (أو اللوح الشمسي) تتكون من توصيل الخلايا الشمسية مع بعضها، بما في ذلك المكونات الضرورية مثل الإطار، وألواح الزجاج... إلخ.

مولِّد شمسي (Solar Generator): ويقصد به جميع المنظومات الشمسية المستخدمة للنظام الفولتضوئي.

نظام فولتضوئي محقون (Injected Photovoltaic System): يقصد به النظام المحقون في الشبكة العمومية. ويتم عادة حقن النظام الفولتضوئي بشبكة الكهرباء العمومية في البلدان التي تكون فيها الأشعة الشمسية رديئة أو غير متوفرة، لأن استخدام أجهزة التخزين تزيد من تكاليف النظام بسبب غلائها. ولهذا، تُستخدم الشبكة العمومية كمخزن أو كحاجز يتم فيها تخزين الطاقة خلال فترات الإنتاج الزائد وأخذها خلال فترات الافتقار إلى توليد القدرة الفولتضوئية.

نظام فولتضوئي مستقل بذاته (Autonomous Photovoltaic System): يقصد به النظام غير المحقون (غير المرتبط) في الشبكة العمومية. ويتكون هذا النظام المستقل بذاته عادة من اللوح الفولتضوئي، وجهاز تخزين يحتوي على بطارية وأداة تحكّم ملائمة للشحن، وعاكس كهربائي يقوم بتحويل التيار المباشر الناتج من اللوح وجهاز التخزين إلى التيار المتردد المطلوب.

نقطة القدرة القصوى (Maximum Power Point (MPP)): هي حاصل الضرب بين النقطة القصوى للتيار، I_{mp}، والنقطة القصوى للجهد، V_{mp}.

وصلة م-س (P-N Junction): تتألف من رقاقتين من مادة شبه موصلة. الرقاقة الأولى هي من النوع-س الغنية بالإلكترونات الحرة

والرقاقة الثانية من النوع-م الغنية بالفجوات. عند وصل الرقاقتين تنشأ منطقة عازلة بينهما تسمى «منطقة حيز الشحنة» فيتكون الدايود. وتعتبر الوصلة حجر الأساس في صناعة الدايودات، والخلايا الشمسية... إلخ.

وقود أحفوري (Fossil Fuels): هي مصادر الطاقة التي تكوّنت عن طريق موت، وانحلال، وتحوّل، أو تحوير الكائنات الحية، وهي نتاج عملية التمثيل الضوئي التي حدثت قبل عدة ملايين سنة. ويمكن اعتبار الوقود الأحفوري ببساطة بأنها ليست سوى مخازن للطاقة الشمسية أو للأشعة الشمسية. ومن وجهة نظر الإنسان، فإن الموارد الأحفورية يُنظر إليها بأنها محدودة، فالمفهوم «متجددة» من الصعب أن ينطبق عليها.



ثبت المصطلحات

عربي - إنجليزي

احترار كوني	Global Warming
ارتفاع	Elevation
إشارة	Signal
إشارة تحكم	Control Signals
إشعاع	Radiation
أشعة شمسية	Solar irradiance
أطراف كهربية	Electrical Terminals
إعادة تدوير	Recycling
إغراق، إهمال	Dumping
الأمثلية	Optimization
انبعاثات CO_2	CO_2 - Emissions
انعكاس بصري	Optical Reflection
أنود	Anode
تأثير الدفيئة	Greenhouse Effect
تأثير المناخ	Meterological Effect
تأثير النشاطات البشرية	Anthropogenic Effect

Photovoltaic Effect	تأثير فولتضوئي
Corrosion	تآكل، حت
Heat Exchange	تبادل حراري
Chain Analysis	تحليل تسلسلي
Energy Conversion	تحويل الطاقة
Fluctuation	تذبذب
Mounting	تركيب
Troposphere	التروبوسفير
Lamination	تصفيح
Pulse width Modulation	تضمين عرض النبضة
Gassing	تغويز، امرار الغاز
Air Pollution	تلوث الهواء
Photosynthesis	تمثيل ضوئي
Doping	تنشيط، تأشيب
Electromagnetic Compatibility	توافق كهرومغنطيسي
Current	تيار
Avalanche Current	تيار تيهوري
Yield	حاصل، عطاء
Steady State	حالة مستقرة
Spectral Sensitivity	الحساسية الطيفية
Convection	حَمِل (أحد وسائل انتقال الحرارة)
Amorphous Solar Cells	خلايا شمسية لا بلورية
Solar Cell	خلية ضوئية
Integrated Control Circuits	دارات تحكّم متكاملة
Heat Flow Input	دخل الانسياب أو التسرب الحراري
Ambient Temperature	درجة حرارة المحيط

Peak operating Temperature	ذروة حرارة التشغيل
Wafer	رقاقة، وافر
Incidence	سقوط
Solar Grade Silicon	سليكون صنف «شمسي»
Metallurgical Grade Silicon	سليكون صنف «معدني»
Multi-Crystalline Silicon	سليكون متعدد البلوّرة
Azimuth	السمت
Zenith	سمت، أوج
Standard Test Conditions (STC)	شروط التجربة القياسية
Diode	صمام ثنائي، دايود
Bypass Diodes	صمام ثنائي تحويلي
Renewable Energies	طاقات متجددة
Energy	طاقة
Boundary layers	طبقات متاخمة
Coating	طلي (طلاء)
Wave length	الطول الموجي
Inverter	عاكس
External Commutated Inverter	عاكس خارجي موّحِد
Insulation	عزل
Turbidity Factors	عوامل العكورة
Proton Exchange Membrane	غشاء التبادل البروتوني
Atmosphere	الغلاف الجوي
Anti - Reflective	غير عاكس
Over Voltage	فرط فولتية (جهد)
Thermal Loss	فقد حراري
Photovoltaics	فولتضوئي

Nominal Voltage	فولتية إسمية
Commutation Voltage	فولتية توحيد
Voltage	فولتية، جهد
Energy Flux	فيض الطاقة
Power	قدرة
Hydropower	قدرة المياه
Cathode	كاثود
UV - Resistant Cable	كبل مقاوم للأشعة فوق البنفسجية
Photon's Density	كثافة الفوتونات
Conversion Efficiency	كفاءة التحويل
Quantum Effieiency	كفاءة الكمّ
Cumulated Energy Expense (CEE)	كلفة الطاقة المجمعّة
Illuminousity	لماعيِّة، تألقية
Slab	لوح، بلاطة
Deposits	مترسبات
Solar Power Electrolyzer	المحلل الكهربائي لقدرة الطاقة الشمسية
DC - DC Converter	محول DC إلى DC
DC-AC Converters	محولات DC إلى AC
Transformer	محوّلة
Low Pass Filter	مرشح التمرير البطيء
Conventional Sources of Energy	مصادر الطاقة التقليدية
Refractive Index	معامل الانكسار
Temperature Coefficient	المعامل الحراري
Impedance	معاوقة
Resistor	مقاوم
Reflected Component	مكوّنة منعكسة

Energy Balance	موازنة الطاقة
Optical Transmittance	نفاذية بصرية
Maximum Power Point (MPP)	نقطة القدرة القصوى
Polarization Pattern	نموذج استقطاب
Prototype	نموذج أولي
Solar Facades	واجهات شمسية
Module	وحدة، موديول



ثبت المصطلحات

إنجليزي - عربي

Air Pollution	تلوث الهواء
Ambient Temperature	درجة حرارة المحيط
Amorphous Solar Cells	خلايا شمسية لا بلورية
Anode	أنود
Anthropogenic Effect	تأثير النشاطات البشرية
Anti - Reflective	غير عاكس
Atmosphere	الغلاف الجوي
Avalanche Current	تيار تيهوري
Azimuth	السمت
Boundary layers	طبقات متاخمة
Bypass Diodes	صمام ثنائي تحويلي
Cathode	كاثود
Chain Analysis	تحليل تسلسلي
CO_2 - Emissions	انبعاثات CO_2
Coating	طلي (طلاء)
Commutation Voltage	فولتية توحيد

Control Signals	إشارة تحكم
Convection	حَمل (أحد وسائل انتقال الحرارة)
Conventional Sources of Energy	مصادر الطاقة التقليدية
Conversion Efficiency	كفاءة التحويل
Corrosion	تآكل، حت
Cumulated Energy Expense (CEE)	كلفة الطاقة المجمّعة
Current	تيار
DC - DC Converter	محول DC إلى DC
DC-AC Converters	محولات DC إلى AC
Deposits	مترسبات
Diode	صمام ثنائي، دايود
Doping	تنشيط، تأشيب
Dumping	إغراق، إهمال
Electrical Terminals	أطراف كهربية
Electromagnetic Compatibility	توافق كهرومغنطيسي
Elevation	ارتفاع
Energy	طاقة
Energy Balance	موازنة الطاقة
Energy Conversion	تحويل الطاقة
Energy Flux	فيض الطاقة
External Commutated Inverter	عاكس خارجي موّحِد
Fluctuation	تذبذب
Gassing	تغويز، امرار الغاز
Global Warming	احترار كوني
Greenhouse Effect	تأثير الدفيئة
Heat Exchange	تبادل حراري

Heat Flow Input	دخل الانسياب أو التسرب الحراري
Hydropower	قدرة المياه
Illuminousity	لماعيِّة، تألقية
Impedance	معاوقة
Incidence	سقوط
Insulation	عزل
Integrated Control Circuits	دارات تحكّم متكاملة
Inverter	عاكس
Lamination	تصفيح
Low Pass Filter	مرشح التمرير البطيء
Maximum Power Point (MPP)	نقطة القدرة القصوى
Metallurgical Grade Silicon	سليكون صنف «معدني»
Meterological Effect	تأثير المناخ
Module	وحدة، موديول
Mounting	تركيب
Multi-Crystalline Silicon	سليكون متعدد البلوّرة
Nominal Voltage	فولتية إسمية
Optical Reflection	انعكاس بصري
Optical Transmittance	نفاذية بصرية
Optimization	الأمثلية
Over Voltage	فرط فولتية (جهد)
Peak operating Temperature	ذروة حرارة التشغيل
Photon's Density	كثافة الفوتونات
Photosynthesis	تمثيل ضوئي
Photovoltaic Effect	تأثير فولتضوئي
Photovoltaics	فولتضوئي

Polarization Pattern	نموذج استقطاب
Power	قدرة
Proton Exchange Membrane	غشاء التبادل البروتوني
Prototype	نموذج أولي
Pulse width Modulation	تضمين عرض النبضة
Quantum Efficiency	كفاءة الكمّ
Radiation	إشعاع
Recycling	إعادة تدوير
Reflected Component	مكوّنة منعكسة
Refractive Index	معامل الانكسار
Renewable Energies	طاقات متجددة
Resistor	مقاوم
Signal	إشارة
Slab	لوح، بلاطة
Solar Cell	خلية ضوئية
Solar Facades	واجهات شمسية
Solar Grade Silicon	سليكون صنف «شمسي»
Solar irradiance	أشعة شمسية
Solar Power Electrolyzer	المحلل الكهربائي لقدرة الطاقة الشمسية
Spectral Sensitivity	الحساسية الطيفية
Standard Test Conditions (STC)	شروط التجربة القياسية
Steady State	حالة مستقرة
Temperature Coefficient	المعامل الحراري
Thermal Loss	فقد حراري
Transformer	محوّلة
Troposphere	التروبوسفير

Turbidity Factors	عوامل العكورة
UV - Resistant Cable	كبل مقاوم للأشعة فوق البنفسجية
Voltage	فولتية، جهد
Wafer	رقاقة، وافر
Wave length	الطول الموجي
Yield	حاصل، عطاء
Zenith	سمت، أوج



المراجع

Abid NC (1987). Contribution à l'étude de la production de froid à l'aide de capteurs à caloducs. Master thesis, Institute of Physics at the University of Constantine, Algeria.

Allen MR, Scott PA., Mitchell JFB., Schnur R (2000). Quantifying the uncertainty in forecasts of anthropogenic climate change. *Nature*, 407: 617-620.

Alsema EA, van Brummelen M (1995-1998). Minder CO_2 door PV. Vakgroep Natuurwentenschap en Samenleving, University of Utrecht, The Netherlands.

Alsema EA, MJ de Wild-Scholten (2005). The real environmental impacts of crystalline silicon PV module: an analysis based on up-to-date manufacturers data. In: Proceedings of the 20^{th} European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Barcelona.

Archer, C.B. (1980). Comments on "Calculating the Position of the Sun". *Solar Energy*, 25: 91.

Arrhenius, S. (1896). On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Phil. Mag. Sci.*, 5: 237-276.

Astronomical Almanac, 1997 Edition (1996). Particle Physics and Astronomy Research Council, London 1996; U.S.

Govt. Printing Office, Washington D.C.

Aulich H, Schulze F. W. and B. Strake (1986). *Sonnenenergie*, 6/86: 14 ff.

Azzam RMA, Bashara N.M (1987). *Ellipsometry and Polarized Light*. Amsterdam: Elsevier.

Bach, W. (1996a). Energie und Klima. Spektrum der Wissenschaft: 30-36.

Bach, W. (1996b). Weltbevölkerung, Energieverbrauch und Klimaschutz. Dossier: Klima und Energie: 24-33, Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft Verlag.

BAM - Isecke B, Weltschev M, Heinz I (1990). Volkswirtschaftliche Verluste durch umweltverschmutzungsbedingte Materialschäden in der Bundesrepublik Deutschland. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Institute for Environmental Protection, University of Dortmund.

Becker W, Braun D (1990). Kunststoff-Handbuch. Vol. 1; Die Kunststoffe. Hanser, Munich Vienna.

Berz, G. (1996). Klimaänderung: mögliche Auswirkungen und Gegenmaânahmen. Energiewirtschaftliche Tagesfragen. 46. Jg No. 7: 440-446.

Bergmann, Schaefer; Niedrig, H. (Editor) (1993). Optik. 9^{th} Edn. de Gruyter, Berlin, New York.

Beyer, HG, Luther J, Steinberger-Willms R (1990). Zum Speicherbedarf in elektrischen Netzen bei hoher Einspeisung aus fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen. Brennstoff, Wärme, Kraft, 42: 430-435.

Bloss WH, Pfisterer F. (1992). Photovoltaische Systeme - Energiebilanz und CO_2 - Reduktionspotential. VDI-Berichte, 942: 71-87.

BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft (1996). Energieda-

ten ’96 Nationale und Internationale Entwicklung. Editor: Referat für Öffentlichkeitsarbeit des Bundesministerium für Wirtschaft, 53107 Bonn (Germany).

Born M, Wolf E (1975). Principles of Optics (5th ed.). Pergamon, Oxford.

Brauch, HG (Ed) (1997). Energiepolitik: technische Entwicklung, politische Strategien, Handlungskonzepte zu erneuerbaren Energien und zur rationellen Energienutzung. Springer, Berlin Heidelberg New York.

Bruton TM, Scott RDW, Nagle J. P, Man MCM, Fackerall AD (1994). Re-Cycling of High Value, High Energy Content Components of Silicon PV Modules. In: Proceedings of the 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam. Vol.1, pp: 303-304.

Campbell, W. (1997). Introduction to geomagnetic fields. Cambridge University Press, Cambridge (UK).

Cap, F. (1992). Graue Energie und der Treibhauseffekt. Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft Vol. 45, 12: 507-519.

Charlson, RJ, Wigley TML (1996). Sulfat-Aerosole und Klimawandel. In: Dossier: Klima und Energie:. 74-81. Spektrum der Wissenschaft Verlag, Heidelberg.

Charlson R.J., Schwartz SE, Hales J.M. [et al.] (1992). Climatic Forcing by Anthropogenic Aerosols, In: Science, Vol. 255: 423-430.

Churchill, S.W. (1977). A Comprehensive Correlating Equation for Laminar, Assisting, Forced and Free Convection. AIChE 10: 10-16.

CRC - Lide DR. (ed.) (1994). Handbook of Chemistry and Physics. Boca Raton FL, (USA): CRC Press, Boca Raton, Florida.

CRC - Lide DR (ed.) (2005). Handbook of Chemistry and Physics. Boca Raton FL, (USA): CRC Press, Boca Raton, Florida.

Culp, A,W. (1991). Principles of Energy Conversion. McGraw-Hill, New York.

Day J., Johnson R, Gray D (1991). Markets, Sales and Distribution in the Photovoltaic Industry. In: Tutorial Notebook of the 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, NV USA.

DB (1995). Enquete-Kommission des 12. Deutschen Bundestages: Mehr Zukunft für die Erde: Nachhaltige Energiepolitik für dauerhaften Klimaschutz. Bonn: Economica Verlag.

Dietz N (1991). Charakterisierung von Halbleitern für photovoltaische Anwendungen mit Hilfe der Brewsterwinkelspektroskopie. Ph.D. thesis at Hahn-Meitner-Institut Berlin, Berlin.

DIN 5034 part 2 (1985). Tageslicht in Innenräumen; Normenausschuâ Lichttechnik (FNL). Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth, Berlin.

Doka G, Frischknecht R, Hofstetter P, Knoepfel I, Suter P, Walder E, Dones, R. (1995). Ökoinventare für Energiesysteme: Beispiel regenerative Energiesysteme. Brennstoff Wärme Kraft Vol. 47, 5:208-213.

Dubbel; Eds.: Beitz W, Kütter KH (1995). Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. 18th edn., Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Duffie JA, Beckmann WA (1974). Solar Energy Thermal Process. John Wiley & Sons, New York, London, Sydney, Toronto.

Ebersperger R. (1995). Beispiele für Zurechnungsverfahren des Energieaufwands bei Entsorgung und Recycling von Produkten. VDI Berichte No. 1218: 11-31.

Emery K, Burdick J, Caiyem Y., Dunlavy D., Field H., Kroposki B., Moriatry, T. (1996). Temperature Dependence of Photovoltaic Cells, Modules and Systems. In: Proceedings of the 25[th] IEEE-PV-Specialists Conference., Washington D.C., USA, pp. 1275-1278.

Ewers, HJ., Rennings K. (1991). Die volkswirtschaftlichen Schäden eines Super- GAU's in Biblis. Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht 4/91: 379-396.

Faber, M., Jöst F, Proops J, Wagenhals G. (1996). Wirtschaftliche Aspekte des Kohlendioxid-Problems. In: Dossier: Klima und Energie: 43-51. Spektrum der Wissenschaft Verlag, Heidelberg.

Faninger, F. (1991). Wege zur Reduktion energiebedingter Emissionen. In: ÖZE 44 (2): 43-63.

Farkas, I. (1992). A Meteorological Model for Solar Engineering Applications. In: Proceedings of the Second World Renewable Energy Congress, Reading (UK). Vol. 5: 2731-2735.

Fichtner (1986). Umweltvergleich von elektrischen mit anderen Heizungssystemen, Teil II. Ed.: Förderungsgesellschaft Technischer Ausbau e.V., Bonn.

Fischedick M, Kaltschmitt M (1994). Stromversorgung unter Integration einer Elektrizitätserzeugung aus Windkraft, Photovoltaik und Biogas. In: Proceedings of the Ninth International Solar Forum, Stuttgart, Vol. 2: 1547-1554.

Fischedick M, Barth V., Burdick B. (1999). Stellungnahme zu dem Aufsatz "Kohlendioxid, Windenergienutzung und Klima" von Prof. Weigl. Report of Wuppertal Institute, Germany.

Flachglas Solartechnik GmbH (1989). CSG-Opti-Solar, Chemically Strengthened Glass. Data sheet IOCR 2905. Cologne: Flachglas-AG.

Flohn H. (1989). Kann die Menschheit eine Klimaänderung verhindern? In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 39. Jg. 1-2: 42-46.

Frisch, von K (1965). Tanzsprache und Orientierung von Bienen. Springer, Berlin Heidelberg, New York.

Fischknecht R., Dones R., Hofstetter P., Knoepfel I, Zollinger E. (1995). Ökoinventare für Energiesysteme. Grundlagen für den Ökologischen Vergleich von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz, im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft und des Nationalen Energie-Forschungs-Fonds, ETH Zürich / Paul Scherrer Institute, 2nd Edn., Zürich (Switzerland).

Fischknecht R., Dones R., Hofstetter P, Knoepfel I, Zollinger E (1996). Ökoinventare für Energiesysteme. Laboratorium für Energiesysteme der ETH Zürich und Forschungsbereich 4 des Paul Scherrer Instituts, 3rd Edn., Zurich (Switzerland).

Fritsche U. (1989). Emissionsmatrix für klimarelevante Schadstoffe in der BRD. Öko-Institut Darmstadt (Germany).

Fritsche U., Rausch L., Simon K-H (1993). Endbericht Gesamt-Emissions-Modell Integrierte Systeme (GEMIS), Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten. Frankfurt a.M. (Germany).

Fuentes MK (1985). Thermal Characterization of Flat-Plate Photovoltaic Arrays. In: Proceedings of 18th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas NV (USA), pp. 203-207.

Fujii T., Imura H (1972). Natural-Convection Heat Transfer from a Plate with Arbitrary Inclination. In: Int. Journal of Heat and Mass Transfer 15, pp. 755-757.

Funck G. (1985). Wärmeabführung bei Getrieben unter quasistationären Betriebsbedingungen Ph.D. thesis, Technical University of Munich (Germany).

Geiger B. (1993). Energetische Lebenszyklusanalyse von Gebäuden. In: Kumulierte Energie- und Stoffbilanzen - ihre Bedeutung für Ökobilanzen. Meeting in Munich. VDI-Gesellschaft Energietechnik. VDI-Berichte Nr. 1093. VDI-Verlag, Düsseldorf.

Gelen H (1994). Milieugerichte levencyclusanalyse van bulkmaterialien toegepast in zonnecelsystemen. Report 94068. Vakgroep NW & S, Universiteit Utrecht.

GEMIS - Fritsche U, Leuchtner J, Matthes FC, Rausch L, Simon K-H (1992). Gesamt Emissions Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 2.0 Endbericht. Öko-Institut & GH Kassel, Darmstadt Kassel.

Gieck K (1989). Technische Formelsammlung. 19th Edn. Heilbronn: Gieck.

Gieck K & R (2005). Technische Formelsammlung. 31st German Edn. (78th global. Edn.). Gieck, Germering.

Goetzberger A, Voâ B, Knobloch J. (1994). Sonnenenergie: Photovoltaik. B. G. Teubner, Stuttgart.

Green M (1995). Silicon Solar Cells: Advanced Principles & Practice. Centre for Photovoltaic Systems and Devices, University of New South Wales, Sydney.

Green M (2000). Photovoltaics: Technology overview. Energy Policy 28: 989-998.

Grimm W-D., Schwarz U. (1985). Naturwerksteine und ihre Verwitterung an Münchener Bauten und Denkmälern. Arbeitsheft 31. Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege, Munich.

Gueris C., Du Pont, European Technical Center (1991). Datasheet of ELVAX 150; Solar Transmittance and Reflectance, Refractive Index, Thermal Conductivity. Du Pont de Nemours, Le Grand-Saconnex (Switzerland).

Häberlin H., Röthilsberger HR (1993). Neue Photovoltaik-Wechselrichter im Test. Bulletin. Schweizerischer Elektrotechnischer Verein, Vol. 84, No. 10: 44-50.

Hagedorn G. (1989). Kumulierter Energieverbrauch und Erntefaktoren von Photovoltaik-Systemen. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Vol. 39, No. 11: 712-718.

Hagedorn, G, (1990). CO_2-Reduktions-Potential photovoltaischer Systeme. Sonnenenergie 1/90 : 12-15.

Hagedorn G, Hellriegel E. (1992). Umweltrelevante Masseneinträge bei der Herstellung von Solarzellen. Forschungsstelle für Energiewirtschaft, Munich.

Hanitsch R, Lorenz U., Petzold D. (1986) Handbuchreihe Energieberatung/ Energiemanagement. Eds.: Winje, D. and Hanitsch, R., Vol. V: Elektrische Energietechnik. Springer. Berlin Heidelberg, New York, Springer.

Hantsche U., Hirtz W, Huber W., Kolb G. (1991). Umweltvorsorgeprüfung bei Forschungsvorhaben am Beispiel Photovoltaik. Programmgruppe Systemforschung und technologische Entwicklung, Forschungsentrum Jülich GmbH (KFA), 3rd interim report, Jülich.

Hantsche U. (1993). Abschätzung des kumulierten Energieaufwandes und der damit verbundenen Emissionen zur Herstellung ausgewählter Baumaterialien. In: Kumulierte Energie- und Stoffbilanzen - ihre Bedeutung für Ökobilanzen. Meeting in Munich. VDI-Gesellschaft Energietechnik, VDI-Berichte Nr. 1093. VDI-Verlag Düsseldorf.

Happoldt H, Oeding D. (1978). Elektrische Kraftwerke und Netze. Fifth revised edn. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Hart GW, Raghuraman P. (1982). Residential Photovoltaic-System Simulation: Thermal Aspects. Massachusetts

Inst. of Technology, Lexington (USA).

Heywang W, Müller R (1980). Halbleiter-Elektronik. Winstel G. (Ed.), Vol. 10. Optoelektronik I. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Hoagland, W. (1996). Regenerative Energien: Sonnenenergie. In: Dossier: Klima und Energie, Spektrum der Wissenschaft. Heidelberg, pp. 100ff.

Hoelscher JF. (1981). The Solarex IV Module. The Conf. Record of the 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Orlando FL (USA), pp. 745-749.

Höner, R. (1997). Wirtschaftlichkeitsanalyse der photovoltaischen Stromversorgung anhand von Energiebilanzen. Studienarbeit am Institut für Elektrische Energietechnik am Fachbereich Elektrotechnik der TU Berlin.

Hoffmann VU, K Kiefer (1994). Das 1000-Dächer-Programm: Eine Zwischenbilanz. Sonnenenergie & Wärmetechnik 2/94: 22-97.

Holman, J. P. (1990). Heat Transfer. McGraw-Hill, New York.

Homeyer, O. (1989). Soziale Kosten des Energieverbrauchs. Second revised and extended edn. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Homeyer O., Gärtner M. (1992). Die Kosten der Klimaänderung - Bericht an die EU-Kommission. Fraunhofer-Gesellschaft, Karlsruhe (Germany).

Hornbogen, E (1994). Werkstoffe. 6th edited and revised edn. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Huber W., Kolb G. (1995). Life cycle Analysis of Silicon based Photovoltaic Systems. Solar Energy, 54:153-163.

Hummel F, Müh H., Wenisch R., Bystron K, Pfeifle R. (1994). Wirkungsgrade und Netzrückwirkungen

verschiedener Wechselrichter. In: Proceedings of the Ninth International Solar Forum, Stuttgart (Germany) Vol. 1, pp. 566-573.

Hütte - Akaedemischer Verein Hütte e.V. (Ed.) (2000). Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. edited by H. Czichos, 31st revised and extended Edn. Springer, Berlin Heidelberg New York.

Hütte - Akaedemischer Verein Hütte e. V. (Ed.) (2004). Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. edited by H. Czichos and M. Hennecke, 32nd revised and extended Edn. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (1990). The IPCC Scientific Assessment. Eds.: J. T. Houghton, G. J. Jenkins, J. J. Ephraums. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (1994). Radiative forcing of climate change. Report to IPCC from the Scientific Assessment Working Group, WMO/UNEP.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2001). Third Assessment Report (TAR).

Jantsch M, Schmid H, J Schmid (1993). Einfluâ von Qualität der Systemkomponenten auf die Energiebilanz von Photovoltaik-Anlagen. In: Proceedings of the Eighth Symposium on Photovoltaic Solar Energy, Staffelstein (Germany), pp. 209-219.

Jellison GE, Wood RF. (1985). Antireflection Coatings for Planar Silicon Solar Cells. Solid State Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN (USA).

Jensen, Ch (1961). Die Polarisation des Himmelslichts. In: Handbuch der Geophysik, Vol. VIII, Chapter 9, Eds.: Linke F, Möller F, Gebrüder Borntraeger, Berlin, pp. 1942-1961.

Johnson AJ, Outhred HR, Watt M (1997). An Energy Analysis of Inverters for Grid-Connected Photovoltaic Systems. In: Proceedings of the 14th European Photovoltaic Conference, Barcelona (Spain), pp. 2194-2197.

Joos F, Sarmiento JL (1995). Der Anstieg des atmosphärischen Kohlendioxids. Physikalische Blätter 51, Nr. 5: 405-411.

Kambezidis HD, Papanikolaou NS (1990). Solar Position and Atmospheric Refraction. Solar Energy, 44:143-144.

Kaltschmitt M, Voâ A (1991). Leistungseffekte einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung. Elektrizitätswirtschaft 90, 8:365-371.

Kaltschmitt M (1994). Erneuerbare Energieträger im Kontext des Energiesystems der Bundesrepublik Deutschland. In: Proceedings of the Ninth International Solar Forum, Stuttgart (Germany), Vol. 2, pp. 1709-1716.

Kaltschmitt M, Wiese A (1995a). Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Kaltschmitt M, Fischedick M (1995). Wind- und Solarstrom im Kraftwerksverbund - Möglichkeiten und Grenzen. C. F. Müller, Heidelberg.

Kaltschmitt M, Wiese A (Ed.) (1997). Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 2nd edn. Springer, Berlin Heidelberg New York.

Kaltschmitt M, Wiese A, Streicher W (Ed.) (2003). Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 3rd revised edn. Springer, Berlin Heidelberg New York.

Khartchenko N. (1995). Thermische Solaranlagen. Verlag für Wissenschaft und Forschung - VWF, 1st Edn. Berlin.

Khartchenko N. (2004). Thermische Solaranlagen. 2nd revised

and extended edn. Verlag für Wissenschaft und Forschung - VWF, Berlin.

Kaufman YJ. Dah-Ming Chou (1993). Model Simulations of the Competing Climate Effects of SO_2 and CO_2. J of Climate. 6, No. 7:1241-1252.

Kayne J, Outhred H, Srensen B. (1992). System Aspects of Grid-Connected Photovoltaic Power Systems. In: Proceedings of the 11^{th} European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Montreux (Switzerland), pp 1195-1198.

Keeling CD, Whorf TP (2004). Atmospheric CO_2 concentrations (ppmv) derived from in situ air samples collected at Mauna Loa Observatory, Hawaii. Carbon Dioxide Research Group, Scripps Institution of Oceanography (SIO); University of California.

Keoleian GA, Lewis GM (1997). Application of life-cycle analysis to photovoltaic module design. Progress in Photovoltaics 5:287-300.

Kern W, Tracy E (1980). Titanium Dioxide Antireflection Coating for Silicon Solar Cells by Spray Deposition. RCA Review 41:133-180.

Kiefer K, T. Erge (1994). Ergebnisse der Auswertung des 1000-Dächer-Programms. In: Proceedings of the Ninth International Solar Forum Vol. 1, Stuttgart (Germany), pp. 443-450.

Kiehl JT, Briegleb BP (1993). The Relative Roles of Sulfate Aerosols and Greenhouse Gases in Climate Forcing. In: Science, 260: 311-314.

King DL, Eckert PE (1996). Characterizing (Rating) the Performance of Large Photovoltaic Arrays for All Operating Conditions. In: Proceedings of the 25^{th} IEEE-PV-Specialists Conference, Washington D.C. (USA), pp. 1385-1388.

Kleemann M, Meliâ, M (1993). Regenerative Energiequellen. Second revised Edn. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Klein MV, Furtak TE (1988). Optik (Translation by A. Dorsel and T. Hellmuth). Springer, Berlin, Heidelberg New York.

Kleiss G (1997). Energetische Bewertung von photovoltaischen Modulen auf der Grundlage der Jahreswirkungsgradmethode. Köster, Berlin.

Knaupp W. (1996). Operation Behaviour of Roof Installed Photovoltaic Modules. In: Proceedings of the 25th IEEE-PV-Specialists Conference, Washington D.C., USA, pp. 1445-1448.

Krauter S, Hanitsch R (1990). The Influence of the Capsulation on the Efficiency of PV-Modules. In: Proceedings of the 1st World Renewable Energy Congress, Reading (UK), Vol. 1, pp. 141-144.

Krauter S, Hanitsch R, Strauâ Ph (1991). Simulation-Program for Selecting Efficiency Improving Strategies of PV-Module-Encapsulations under Operating Conditions. In: Proceedings of "Renewable Energy Sources '91" Int. Conf., Prague (CFSR), Vol. III, pp. 48-53.

Krauter S, Hanitsch R. (1992). Improvement of PV-Performance by Partly Structured Surfaces. Proceedings of the 6th Photovoltaic Science and Engineering Conference, New Delhi (India), pp. 1110.

Krauter S, Hanitsch R, Diwisch N. (1992d). Measuring the Heat-Transfer Coefficient of PV-Modules. In: Proceedings of the 2nd World Renewable Energy Congress, Reading (UK), pp. 562-566.

Krauter S, Hanitsch R (1992e). Performance of a Partly Structured Surface at a PV-Module. In: Proceedings of

the 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference an Exhibition, Montreux (Switzerland), pp. 1351-1354.

Krauter S, Hanitsch R (1993a). Calculating the Influence of Skylight-Polarization on the Transmission of Encapsulations of PV-Modules. In: Proceedings of the Cairo International Conference of Renewable Energy Sources, Cairo (Egypt).

Krauter S, Hanitsch R (1993b). Optical and Thermal Parameters of PV-Module Encapsulation Improving Output Power. In: Proceedings of the ISES Solar World Congress, Budapest (Hungary), pp. 249-254.

Krauter S (1993c). Betriebsmodell der optischen thermischen und elektrischen Parameter von PV-Modulen. Köster, Berlin.

Krauter S, Hanitsch R, Campbell P, Wenham SR. (1994a). Optical Modelling, Simulation and Improvement of PV Module Encapsulation. In: Proceedings of the 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, Vol. 2, pp. 1198-1201.

Krauter S, Hanitsch R, Strauâ Ph (1994b). Einfluâ optischer und thermischer Parameter auf den Tageswirkungsgrad von photovoltaischen Modulen. Ninth International Solar Forum, Berlin (Germany), Vol. 1, pp. 495-502.

Krauter S, Hanitsch R, Wenham SR. (1994c). Simulation of Thermal and Optical Performance of PV Modules. In: Proceedings of the 3rd World Renewable Energy Congress, Reading (UK).

Krauter S, Hanitsch R, Moreira L. (1996a). New Optical and Thermal Enhanced PV Modules Performing 12 % Better under True Module Rating Conditions. In: Proceedings of the 25th IEEE-PV-Specialists Conference, Washington D.C., USA, pp. 1323-1326.

Krauter S, Hanitsch R (1996b). Actual Optical and Thermal

Performance of PV Modules. Solar Energy Materials and Solar Cells 41/42: 557-574.

Krauter S (2004). Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels. Solar Energy Materials and Solar Cells 82: 131-137.

Kuchling H (1995). Taschenbuch der Physik. 16th edition. Fachbuchverlag, Leipzig.

LBST - Lutwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (1995). Studie "Solarfabrik '96" im Auftrag von Greenpeace e.V., Munich (Germany).

Leidner JR, Linton W. (1991). L'impact des charactéristiques d'onduleurs sur la production d'énergie par des installations photovoltaiques. Bulletin Schweizerischer Elektrotechn. Verein, 82, No. 10: 37-44.

Lehmann H, Raetz T(1995). Zukunftsenergien: Strategien einer neuen Energiepolitik. Birkhäuser, Berlin Basel Boston.

Lenzen M (1999). Greenhouse Gas Analysis of solar-thermal electricity generation. Solar Energy 65, No. 6: 353-368.

Levi L. (1980). Applied Optics. A Guide to Optical System Design. Vol. 2. Wiley & Sons, New York Chichester Brisbane Toronto.

Lewin B. (1993a). CO_2-Emission von Energiesystemen zur Stromerzeugung unter Berücksichtigung der Energiewandlungsketten. Ph.D. thesis at the Department of Mining and Geosciences at the Technical University of Berlin.

Lewin B. (1993b). CO_2-Emission von Kraftwerken unter Berücksichtigung der vorund nachgelagerten Energieketten. In: Kumulierte Energie- und Stoffbilanzen - ihre Bedeutung für Ökobilanzen. VDI-Berichte Nr. 1093. VDI-Verlag, Düsseldorf.

Lelièvre J-F., Kaminski A., Boyeaux J-P., Monna R, Lemiti M (2005). Optical properties of PECVD and UVCVD SiN_x:H antireflection coatings for silicon solar cells. In: Proceedings of the 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1111-1114.

Linder H, Knodel H, Blääer U, Danzer A, Knull U. (1948/1977) Linder - Biologie. 18th total revised Edn. JB Metzlersche Verlagsbuchhandlung and Carl Ernst Poeschel Verlag, Stuttgart.

Lobbes A (1997). Simulation der atmosphärischen Streuung und Himmelspolarisation von Sonnenstrahlung zur Bestimmung von Reflexionsverlusten an Solargeneratoren. Thesis at Department of Electrical Engineering, Technical University of Berlin.

Lund PD, Pylkkänen T. (1987). Fast Parametrization Procedure of Solar Cells. Helsinki University of Technology, Department of Technical Physics, Espoo (Finland).

Macagnan MH, Lorenzo E. (1992). On the optimal size of inverters for grid connected PV systems. In: Proceedings of the 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Montreux (Switzerland), pp. 1167-1170.

Mason NB, Bruton TM, Russell R. (1995). Properties and Performance of Coloured Solar Cells for Building Facades. In: Proceedings of the 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Nice (France), pp. 2218-2219.

Mauch W. (1995). Ganzheitliche energetische Bilanzierung von Kraftwerken. VDI-Berichte Nr. 1218 pp. 135-147. VDI-Verlag, Düsseldorf.

Meadows DH, Meadows DL, Randers J, Behrens III, WW. (1972). The Limits to Growth. Universe Books, New York.

Mende D., Simon G. (1981). Physik - Gleichungen und Ta-

bellen. VEB Fachbuchverlag, Leipzig.

Menges G. (1977). Forschungsprogramm Wiederverwertung von Kunststoffabfällen. Ed.: Verband Kunststofferzeugende Industrie e.V. (VKE), Frankfurt/Main.

Merker GP. (1987). Konvektive Wärmeübertragung. Springer, Berlin Heidelberg New York.

Mertens R., Nijs J, Van Overstraeten R., Palz W. (1992). Summary of Panel Discussion. Technical Goals and Financial Means for PV Development. In: Proceedings of the 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Montreux (Switzerland), pp 1009-1013.

Mertens K. (1997). Die weltweite Marktentwicklung der Photovoltaik. In: Sonnenenergie & Wärmetechnik 1/97:26-30.

Moser R., Blum W. (1993). Energiestatistik der Photovoltaikanlagen in der schweiz Ende 1992. Bulletin Schweizerischer Elektrotechnischer Verein, Vol. 84, No. 10: 11-15.

Müller K., Block L., Neuendorf H (1994). Regenerative Energien - eine neues Dienstleistungsangebot der Berliner Energieversorgung (Auswertung "1000-Dächer-Programm" und Projektvorstellung). In: Proceedings of the Ninth International Solar Forum, Stuttgart (Germany), Vol. 1, pp. 451-458.

Munich Re Group (2005). Topics Geo - Annual review natural catastrophes 2004. Munich Re, Munich.

Münchener Rückvers icherungsgesellschaft (1996). Jahresrückblick Naturkatastrophen 1995. In: Topics 1996, Munich (Germany).

Mullner AN, Roecker Ch, Bovin J. (1997). Grid-connected PV installation: Comparison between land base and flat roof PV installations. In: 14th European Photovoltaic Conf., Barcelona (Spain), pp. 889-892.

Newinger M. (1985). Einfluâ anthropogener Aerosolteilchen auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre. Hamburger Geophysikalische Einzelschriften, Reihe A: Wissenschaftliche Abhandlungen, Vol. 73, Hamburg (Germany).

Nordmann T. (1993). Behauptungen und Stellungnahmen zum Thema Photovoltaik. Bulletin. Schweizerischer Elektrotechnischer Verein, Vol. 84, No. 10: 41-43.

Palik E. D. (1985). Handbook of Optical Constants of Solids.Academic Press, London.

Palmer J. (1992). Couraulds Performance Films. Andus, Chandler, AZ (USA).

Palz W, Zibetta H (1991). In: Solar Energy, Vol.10: 221 ff.

PEC - Product Ecology Consulants: (1996). LCA methology. WWW, The Netherlands.

Perez R., Seals R., Michalsky J. (1993). An all-weather model for sky luminance distribution. Solar Energy 50: 235-245.

Photocap - Solar Cell Encapsulants -Technical Guide (1996). Springborn Materials Science Corp., Enfield, CT (USA).

Posansky M (1991). Neue Möglichkeiten für die solare Stromgewinnung mit gebäudeintegrierten Solargeneratoren. Bulletin Schweizerischer Elektrotechnischer Verein, Vol. 82, No. 10: 49-50.

Preu R, Kleiss G, Reiche K, Bücher K (1995). PV-Module Reflection Losses: Measurement, Simulation and Influence on Energy Yield and Performance Ratio. In: Proceedings of the 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Nice (France), pp. 1485-1488.

Räuber A (1995). Entwicklungstendenzen der Photovoltaik. Technologie - Märkte - Forschungsförderung. In: Proceedings of the Tenth Symposium for Photovoltaic Solar

Energy, Staffelstein (Germany), pp. 27-33.

Rauschenbach HS. (1980). Solar Cell Array Design Handbook. chapter 9: Environments and their effects. Van Nostrand Reinhold, New York.

Real M., Spreng D. (1991). Energieaufwand zur Herstellung von Solarzellen - Besprechung eines Forschungsberichtes. Bulletin. Schweizerischer Elektrotechnischer Verein, 82, No. 10: 11-15.

Reiche K, Kleiss G., Bücher K. (1994). Energetische Bewertung von Photovoltaik-Modulen unter realistischen Bezugsbedingungen. In: Proceedings of the Ninth International Solar Forum, Stuttgart (Germany), Vol.1, pp. 471-478.

Reichert T. (1996). Ermittlung des kumulierten Energieaufwands bei der Herstellung einer neuartigen kristallinen Silizium-Dünnschicht-Solarzelle. Master thesis at University of Applied Sciences Munich, Department of Electrical Engineering in colaboration with Lutwig-Bölkow-Systemtechnik Ltd (LBST), Ottobrunn (Germany).

Richaud A (1994). Photovoltaic Commercial Modules: Which Product for Which Market. In: Proceedings of the 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Vol. 1, pp. 7-14.

Sala A (1986). Radiant Properties of Materials. Tables of Radiant Values for Black Body and Real Materials. Elsevier, Amsterdam.

Sandter W. (1993). "Zum Bund-Länder-1000-Dächer-Photovoltaik-Programm", In: Stromdiskussion: Dokumente und Kommentare zur energiewirtschaftlichen und energiepolitischen Diskussion: Erneuerbare Energien. Ihre Nutzung durch die Elektrizitätswirtschaft. IZE, Frankfurt a.M.

Schaefer H (1993). Zur Definition des kumulierten Energieaufwandes (KEA) und seiner primärenergetischen Bewertung. In: Kumulierte Energie- und Stoffbilanzen - ihre Bedeutung für Ökobilanzen. Tagung in München, 30.11.-1.12.1993. VDI-Gesellschaft Energietechnik, VDI-Berichte Nr. 1093. VDI-Verlag, Düsseldorf.

Scheer H (1993). Sonnen-Strategie. Piper, München Zürich.

Scheidewind P., Delaunay JJ., Rommel M. (1994). Verbesserte Tageslichtsimulation durch gemessene und modellierte Leuchtdichteverteilung des Himmels. In: Proceedings of the Ninth International Solar Forum, Stuttgart (Germany), Vol. 2, pp. 997-1004.

Schmela M. (2000). Looking for a grower? - Market survey of crystal growth equipment. Photon International, February: 30-35.

Schmid J. (1988). Photovoltaik - Direktumwandlung von Sonnenlicht in Strom. Verlag T-V Rheinland, Cologne.

Schmid J. (Ed) (1994). Photovoltaik: Strom aus der Sonne; Technologie, Wirtschaftlichkeit und Marktentwicklung. 3rd completely revised edition. Müller, Heidelberg.

Schmid J. (1988). Photovoltaik: Ein Leitfaden für die Praxis. Fachinformationszentrum Karlsruhe (Editor), 3rd completely revised edition. T-V Rheinland, Cologne.

Schmidt H, Sauer DU (1994). Praxisgerechte Modellierung und Abschätzung von Wechselrichter-Wirkungsgraden. Proceedings of the Ninth International Solar Forum, Stuttgart (Germany), Vol.1, pp. 550-557.

Schoedel S. (1993). Photovoltaik: Grundlagen un Komponenten für Projektierung und Installation. 2nd edition. Pflaum, Munich.

Scholze H (1988). Glas: Natur, Struktur und Eigenschaften. Springer, Berlin Heidelberg New York.

Schönwiese C. D. (1995). Klimaänderungen: Daten, Analysen, Prognosen. Springer, Heidelberg Berlin New York.

Schreitmüller KR, Kreuzburg J. (1994). Zur ökonomischen und ökologischen Bewertung regnerativer Energieträger. In: Proceedings of the Ninth International Solar Forum, Stuttgart (Germany), Vol. 2, pp. 1668-1675.

Schulze Th, Weber C, Fahl U, Voss A. (1992). Grundlagenuntersuchung zum Energiebedarf und seinen Bestimmungsfaktoren - 1. Zwischenbericht zum Forschungsbereich III: Rationelle Energ ieanw endung und Energiebedarfsanalysen. University of Stuttgart, Institute for Energy Economy and Rational Energy Use.

Shabana MM, Namour T (1990). Optimum Thickness of Solar Module Front Layers for Maximum Power Output. In: Proceedings of the 1st Word Renewable Energy Congress Vol.1, Reading (UK), pp. 141-144.

Siemens Solar Ltd. (1991) Dicken der Einkapselungsmaterialien eines SM 55 PV-Modules. Fax, Munich (Germany).

Sissine F. (1994). Renewable Energy: A New National Commitment? CRS Issue Letter IB93063, 10.2. CRS, Washington DC.

Sjerps-Koomen EA, Alsema EA, Turkenburg WC (1996). A Simple Model for PV-Module Reflection Losses under Field Conditions. Solar Energy 57, No. 6: 421-432.

Staiâ F, Böânisch H, Mölein J, Pfisterer F, Stellbogen D. (1994). Die Bedeutung der Photovoltaik für eine Klimaverträgliche Energieversorgung in Baden- Württemberg. In: Proceedings of the Ninth International Solar Forum, Stuttgart (Germany), Vol.1, pp. 465-470.

Stelzer T, Wiese A (1994). Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern. Proceedings of the Ninth International Solar Forum, Stutt-

gart (Germany), Vol. 2, pp.1636-1643.

Stewart LH (1995). Untersuchungen von Recyclingpotentialen durch Ausnutzen von Altstoffverträglichkeiten. Master thesis at the Technical University of Berlin, Institute for Technical Environment Protection, Department of Waste Economy.

Stöcker H (1993). Taschenbuch der Physik. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt a. M, Thun.

Strauâ Ph, Onneken K, Krauter S, Hanitsch R (1994). Simulation Tool for Prediction and Optimization of Output Power Considering Thermal and Optical Parameters of PV Module Encapsulation. In: Proceedings of the 12^{th} European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, Vol. 2, pp. 1194-1197.

Strippel M, von Oheimb R. (1994). Erfahrungen mit netzfernen Photovoltaiksystemen in der Landwirtschaft. Proceedings of the Ninth International Solar Forum, Stuttgart (Germany), Vol. 1, pp. 626-633.

Spreng D. (1993). Net-Energy Analysis and the Energy Requirements of Energy Systems. Praeger, New York.

Spreng D, Doka G, Knoepfel I (1995). Graue Energie; Energiebilanzen von Energiesystemen. Teubner, 1995 - Zürich: vdf, Hochschulverlag. an der ETH Zürich, Stuttgart.

Swinbank WC. (1963). Long-Wave Radiation from Clear Skies. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 89: 339-348.

Touloukian YS. (1967). Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials. Volume 1: Elements. Macmillan, New York.

United Nations (1992). Integrated Environmental and Economic Accounting, Handbook of National Accounting. Interim Version, New York.

Vallvé X, Serrasolses J. (1994). Stand-Alone PV-Electrification in La Garroxta (Catalonia, Spain): A 50 kW_p Programme by the Users. In: Proceedings of the 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, Vol. 1, pp. 465-468.

van Engelenburg BCW, Alsema EA, Schropp, REI (1995). Recycling of a-Si Solar Cells. In: Proceedings of the 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Nice (France),Vol.1, pp. 296-299.

Vaucher S. (1993). Aspects écologiques de la production des cellules solaires en silicium amporphe. Institute de Microtechnique, Université de Neuchâtel (Switzerland).

VDI-Kommission Reinhaltung der Luft (1989). Fortschritte bei der thermischen, katalytischen und sorptiven Abgasreinigung. VDI, Düsseldorf (Germany).

VDI - Verband Deutscher Ingenieure (Ed) (1991). VDI-Wärmeatlas. 6th edition, VDI, Düsseldorf (Germany).

Voermans R., Hoppe W. (1994). Photovoltaikanlage "Neurather See" - Erfahrungen der ersten Betriebsjahre. Proceedings of the Ninth International Solar Forum, Stuttgart (Germany), Vol. 1, pp. 363-370.

Voâ A (1993). Sonne - mehr Hoffnungs- als Energieträger? Manuscript Wagner H-J (1992) Umweltaspekte photovoltaischer Systeme. Forschungverbund Sonnenenergie: "Themen 92/93".

Wagner H-J. (1995a). Energie und Emission von Solaranlagen.VDI Fortschrittsberichte, Reihe 6, Nr. 325. VDI-Verlag, Düsseldorf.

Wagner H-J., Brandt Th (1995b). Ermittlung des Primärenergieaufwandes zur Herstellung ausgewählter Werkstoffe. Report, University of Essen, Essen (Germany).

Wagner H-J. (1996). Energieketten von A bis Z - Erntefaktor

und energetische Amortisationszeit. Elektrizitätswirtschaft, Jg. 95,Vol. 8, pp. 448-456.

Wagemann HG., Eschrich H (1994). Grundlagen der photovoltaischen Energiewandlung: Solarstrahlung, Halbleitereigenschaften und Solarzellenkonzepte. Teubner, Stuttgart.

Walraven R. (1978). Calculating the Position of the Sun. Solar Energy 20:393-397.

Wambach K. (1996). Untersuchungen zu den technischen Möglichkeiten der Verwertung und des Recyclings von Solarmodules auf Basis von kristallinem und amorphen Silizium. BMBF: Status report Photovoltaics, Bonn (Germany).

Weast RC (Ed.) (1987). Handbook of Chemistry & Physics. 68^{th} Edn., 2^{nd} reprint. CRC Press, Boca Raton FL (USA).

Welter Ph. (1993). Die Energierücklaufzeit von Photovoltaikanlagen. Sonnenenergie & Wärmetechnik 4/93: 28-30.

Wenham SR, Bowden S, Dickinson M, Largent R, Shaw N, Honsberg CB, Green MA, Smith P (1997). Low cost photovoltaic roof tile. Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 47, Issues 1-4: 325-337.

Whiller A (1967). Design Factors Influencing Solar Collectors. Low Temperature Engineering for Solar Energy. ASHRAE, New York.

Wiese A (1994a). Ausgleichseffekte, gesicherte Leistung und Speicherbedarf einer groâtechnischen regenerativen Stromerzeugung in Deutschland. In: Proceedings of the Ninth International Solar Forum, Stuttgart (Germany), pp. 1539-1546.

Wiese A., Kaltschmitt M. (1994b). CO_2-Substitutionspotential und Minderungskosten regenerativer Energieträger zur

Stromerzeugung in Deutschland. In: Proceedings of the Ninth International Solar Forum, Stuttgart (Germany), Vol. 2, pp. 1644-1651.

Wiese A. (1994c). Simulation und Analyse einer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern in Deutschland. Ph.D. thesis at the Institute for Energy Economy and Rational Use of Energy, University of Stuttgart (Germany).

Wilk H (1994). Erste Ergebnisse aus dem österreichischen 200 kW Photovoltaik Breitentest. Proceedings of the Ninth International Solar Forum, Stuttgart (Germany), Vol.1, pp. 371-381.

Wilkinson BJ. (1983). The Effect of Atmospheric Refraction on the Solar Azimuth. Solar Energy, 30:295.

Worrell E [et al.] (1994). New gross energy requirement figures for materials production. Energy 19 (6): 627-640.

Zimmermann W. (1995). Einstrahlungsabhängigkeit des Parallelwiderstandes von Solarzellen. In: Proceedings of the Tenth Symposium Photovoltaic Solar Energy, Staffelstein (Germany), pp. 643-647.

Zittel W., Baumann A. (1992). Ökologische Belastungen durch solare Stromversorgung im Vergleich zu konventionellen Systemen. Proceedings of the Eighth International Solar Forum, Berlin (Germany), Vol. 2, pp. 646-652.



بعض الأخطاء التي وردت في النسخة الإنجليزية للكتاب وتمّ تصحيحها في الترجمة العربية

الفصل الأول

1 ـ ص 1 في تعريف الشكل (1–1) السطر الثاني، (1995 ـ 1875) غير صحيح، والصواب هو (2004 – 1875).

2 – ص 5 السطر الأخير، 1970 غير صحيح، والصواب هو 1980.

3 ـ ص11 في الجدول رقم (1.3) ـ اسم المرجع Bennewitz غير موجود في قائمة المراجع.

4 ـ ص 12 في تعريف الشكل رقم (1.9)، (Actual and 2003 value) غير صحيح، والصواب هو (nominal and 2003 value).

5 ـ ص 12، السطر 1 يكتب العراق Iraq وليس Iraque.

6 – ص13 السطر التاسع، اسم المرجع (Hohmeyer) غير صحيح، والصواب هو (Homeyer).

الفصل الثاني

1 ـ ص 24 أول كلمة في السطر الأول (Attainable) خاطئة. والصواب هو (Maximum).

2 ـ ص 27 السطر الخامس (in chapter «Irradiance Modeling») غير صحيح لأنه لا يوجد فصل في الكتاب بهذا العنوان. إلاّ أن الفصل الذي يتحدث عن هذا الموضوع هو الفصل السابع.

3 ـ ص 29 السطر الثامن، IEC 904-1 and IEC 891 غير صحيحين طبقاً للجدول Table A 19a في الملاحق. والصواب هو IEC 60904 and IEC 60891.

4 ـ ص 30 في نهاية الجملة التي تحت الشكل (2.11) ـ (see Fig. 2-12) غير صحيح، والصواب هو (see Fig. 2.11).

5 ـ ص 37 في السطر السادس، temperatures of 30 K and more... غير صحيح، والصواب هو temperatures of 300 K and more...

6 ـ ص38 السطر الرابع من الأخير، (see chapter 2.2.2.3) غير صحيح، والصواب هو (see chapter 2.3.2.3).

7 ـ ص 43 السطر الثاني، from 1974 to 1996 (resp. to 1992 in the US)... غير صحيح، والصواب هو from 1974 to 2003 (resp. to 2002 in the US)...

8 ـ ص 43 في نهاية التعريف للشكل (2-20)، in Table A 16... غير صحيح، والصواب هو in Table A 17 ....

9 ـ ص 46 في الجدول (2.2)، المرجعان Staiβ 1995 وFrantzi [et al.] 2000 غير موجودين في قائمة المراجع.

وفي الصف الأخير من الجدول (Total) جمعت المقادير في الأعمدة الأول، والثاني، والثالث، والسادس بشكل خاطئ في حين وضع رقم مجهول (1.15) في العمود الأخير.

10 ـ ص47 السطر الخامس من الأسفل، اسم المرجع P. D. Maycock غير موجود في قائمة المراجع.

الفصل الثالث

1 ـ ص 53 في الجدول (3.1 a)، اسم المرجع Messenger [et al.] 2000 غير موجود في قائمة المراجع.

2 ـ ص 54 في نهاية الفقرة الأولى تحت العنوان (3.3.1)، اسم المرجع Heumann 1996 غير موجود في قائمة المراجع.

3 ـ ص 57 السطر الأخير ـ (Table 3.1) غير صحيح. الصواب هو (Table 3.1 b).

الفصل الرابع

1 ـ ص 71 البند الثالث تحت العنوان (Lithium - Ion Batteries)، اسم المرجع Khumann [et al.] 2000 غير موجود في قائمة المراجع.

2 ـ ص 73 كل المراجع المذكورة تحت الجدول 4.1 غير موجودة في قائمة المراجع.

الفصل الخامس

1 ـ ص 83 السطر الثاني تحت العنوان (Power Conditioning Equipment)، الرمز cos f غير صحيح، والصواب هو cosρ.

الفصل السادس

1 ـ ص 87 السطر الثالث، الرمز (CEC_R) غير صحيح، والصواب هو (CEE_R).

2 ـ ص 87 السطر قبل الأخير تحت العنوان (Preliminary Remarks)، الرمز CEE_M غير صحيح، والصواب هو CEC.

3 ـ ص 96 السطر الرابع $(SiHCl)_3$ غير صحيح، والصواب هو $SiHCl_3$.

4 - ص 96 السطر الثامن، اسم المرجع Green 1986 غير موجود في قائمة المراجع.

5 - ص 96 الفقرة الثانية السطر الخامس، ($SiCl_4$) غير صحيح، والصواب هو ($SiHCl_4$).

6 - ص 105 في الجدول (6.8)، اسم المرجع (Keoleian and Lexis 1997) غير صحيح، والصواب هو (Keoleian and Lewis 1997).

7 - ص 108 السطرين 18 و19، ...Table 17 and 18 shows غير صحيح، والصواب هو ....Tables 6.9 and 6.10 show

8 - ص 109 الجدول (9-6)، في الصفين الأول والثاني تحت العمود الثالث، المقدار 165 غير صحيح، والصواب هو 5.16.

9 - ص 110 السطر الرابع من الأخير، Table 6.8 غير صحيح، والصواب هو Table 6.11.

10 - ص 116 ـ اسم المرجع (Levin 1993) في ثلاث مواضع في هذه الصفحة تحت العنوانين (Dismantling) و(Transport)) غير صحيح. الصواب هو (Lewin 1993).

الفصل السابع

1 - ص 117 تحت العنوان (...7.1.1 Sun's Position) السطر الثاني، ,given by 1978... غير صحيح ـ اسم المرجع مفقود هنا. الصواب هو .given by Walraven 1978 ...

2 - ص 120 في الشكل (7.3)، اسم المرجع Ertürk 1997 غير موجود في قائمة المراجع.

3 - ص 121 السطر الثاني من الأسفل، Figure 50 غير صحيح، والصواب هو Figure 7.4.

4 - ص 122 السطر الرابع من الأسفل، Fig.7.4 غير صحيح، والصواب هو Fig. 7.5. وفي السطر الأخير أيضاً في الصفحة نفسها، Fig. 7.5 غير صحيح، والصواب هو Fig. 7.6.

5 - ص 125 السطر التاسع، Figure 54 غير صحيح، والصواب هو Figure 7.8

6 - ص 125 ـ المعادلة رقم (26) مكتوبة بشكل خاطئ (المشكلة في الأقواس).

7 - ص 126 السطر الثالث من الأخير، Figure 54 غير صحيح، والصواب هو Figure 7.8.

8 - ص 133 السطر الخامس، اسم المرجع Azzan and Bashara يفتقد سنة النشر وغير صحيح. والصواب هو Azzam and Bashara 1987.

9 - ص 133 في نهايتها، يذكر المؤلف بأن k,a,b, μ^2 ليست سوى متغيرات رياضية، مع أنه لم يستخدم الرمزين a و b في المعادلات الواردة. ربما قصد هنا المتغيرات k, x, y, μ^2.

10 - ص 134 السطر الخامس (see Fig. 7.14) غير صحيح، والصواب هو (see Fig. 7.15).

11 - ص 141 وص 142، المعادلتان (72) و(73) مكتوبتان بشكل غير صحيح كالآتي:

$$\tau_{1...m} = \frac{\tau_{1...m}\,\tau_m}{T_{(m-1)m}} \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{\left(\rho_m - R_{(m-1)m}\right)\overline{\rho}_{(m-1)...1}}{T_{(m-1)m}} \right]^{i-1} \quad (72)$$

$$\tau_{1...m} = \frac{\tau_{1...m}\,\tau_m}{T_{(m-1)m} - \left(\rho_m - R_{(m-1)m}\right)\overline{\rho}_{(m-1)...1}} \quad (73)$$

المعادلتان الصحيحتان هما:

$$\tau_{1...m} = \frac{\tau_{1...(m-1)}\,\tau_m}{T_{(m-1)m}} \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{\left(\rho_m - R_{(m-1)m}\right)\overline{\rho}_{(m-1)...1}}{T_{(m-1)m}} \right]^{i-1} \quad (72)$$

$$\tau_{1...m} = \frac{\tau_{1...(m-1)}\,\tau_m}{T_{(m-1)m} - \left(\rho_m - R_{(m-1)m}\right)\overline{\rho}_{(m-1)...1}} \quad (73)$$

12 - ص 143 السطر الأول، Figure 7-18 غير صحيح، والصواب هو Figure 7.19.

13 - ص 146 السطر الخامس، (see Table 5). رقم الجدول غير صحيح، كما لا يوجد جدول للعلاقة بين الزيادة في درجة الحرارة والقدرة المُخرجَة. لهذا، حُذِفت هذه الإشارة إلى الجدول.

14 - ص 164 السطر الخامس من الأسفل، (see Fig. 7.23). غير صحيح، والصواب هو (see Fig. 7.24).

15 - ص165 السطر السابع، (see Fig. 7.24). غير صحيح، والصواب هو (see Fig. 7.25).

16 - ص171 السطر الأول، (see Fig. 7.27) غير صحيح، والصواب هو (see Fig. 7.28).

17 - ص172 السطر الخامس، اسم المرجع (Staiβ 1997) غير موجود في قائمة المراجع.

الفصل التاسع

1 - استخدام كلمة «Commutated» في العبارة (Commutated Energy Expense) في هذا الفصل بالكامل غير صحيح. وقد استُخدمت هذه الكلمة في صفحة 177 في العنوان الرئيسي (9.1) وفي موقعين في التعريف الذي تحته، وأيضاً في صفحة 183 في أول سطر تحت العنوان رقم (9.5.1). العبارة الصائبة هي (Cumulated Energy Expense).

2 - ص 179 السطر الثالث من الأسفل، اسم المرجع (Spreng 1988) غير موجود في قائمة المراجع.

3 - ص 184 السطر الثامن من الأسفل، اسم المرجع (Kaltschmitt 1993) غير موجود في قائمة المراجع.

4 - ص 186 السطر الثامن، اسم المرجع (Staiβ 1996) غير موجود في قائمة المراجع.

5 - ص 186 السطر السابع عشر، اسم المرجع (Staiβ 1995) غير موجود في قائمة المراجع.

الفصل العاشر

1 - ص 207 ـ في داخل الشكل (10.18) يذكر أن المنحنى الثاني هو للمنظومة PQ 50/40، وهذا غير صحيح بحسب الشرح في النص. فالمفروض أن المنحنى الثاني هو للمنظومة PQ 40/10.

الفصل الثاني عشر (الملحق)

1 - ص 236 في الشكل (A1)، اسم المرجع (Heinloth 1996) غير موجود في قائمة المراجع.

2 - ص 240، جميع الأسماء المرجعية الواردة في الجدولين (A6 و A7) غير موجود في قائمة المراجع.



الفهرس

ـ ب ـ

ـ ت ـ

ـ ث ـ

ـ ج ـ

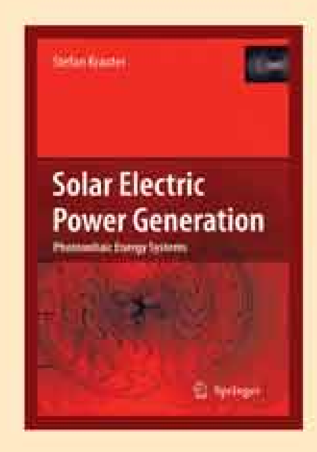
- ك -

- م -

- ن -

- و -

توليد القدرة الكهربائية
من الطاقة الشمسية
أنظمة الطاقة الفولتضوئية(*)



(*) الكتاب الثاني من الطاقة

سلسلة كتب التقنيات الإستراتيجية والمتقدّمة

1. المياه
2. البترول والغاز
3. البتروكيمياء
4. النانو
5. التقنية الحيوية
6. تقنية المعلومات
7. الإلكترونيات والاتصالات والضوئيات
8. الفضاء والطيران
9. الطاقة
10. المواد المتقدمة
11. البيئة

السلسلة: تضم هذه السلسلة ترجمة لأحدث الكتب عن التقنيات التي يحتاج إليها الوطن العربي في البحث والتطوير ونقل المعرفة إلى القارئ العربي.

الكتاب: يقدم الكتاب موازنة تحليلية دقيقة لطاقة النظم الفولتضوئية من حيث الإنتاج والتشغيل والإدامة وعمليات التدوير وتحويل الطاقة بالإضافة إلى تقييم الأداء، ودور الأنواع الحديثة منها في تخفيض الكلفة وتقليص انبعاثات غازات الدفيئة.

يعد الكتاب بما يوفره من قيمة معرفية فضلاً عن الأمثلة والجداول والأشكال التوضيحية، من المراجع العلمية المساعدة لطلاب ومختصي علم هندسة الطاقة وتحويلاتها.

المؤلف: **ستيفان ك. و. كراوتر:** بروفيسور الطاقات المتجددة وهندسة تحولات القدرة الكهربائية في الجامعة التكنولوجية ـ ميونيخ، وحائز على جائزة برلين للطاقة الشمسية لعام 1996، وعلى الجائزة الخضراء «الأميركية» لعام 2006.

المترجم: **عبد الباسط علي صالح كرمان:** دكتوراه في الفلسفة من جامعة تكساس ـ دالاس (1995)، أستاذ مشارك في قسم الفيزياء ـ كلية العلوم، جامعة صنعاء.

توليد القدرة الكهربائية
من الطاقة الشمسية
أنظمة الطاقة الفولتضوئية

ستيفان ك. و. كراوتر

(9 - 2)

مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية KACST

المنظمة العربية للترجمة

الثمن: 25 دولاراً
أو ما يعادلها

ISBN 978-9953-0-1996-3
9 789953 019963